Российская академия наук (РАН)
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН)
Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук (ИРЭ РАН)
Астраханский государственный технический университет (АГТУ)
Московский энергетический институт (МЭИ)

Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2025)

Материалы IX Международной научной конференции

(7-11 октября 2025 г., Гомель, Республика Беларусь)

Под общей редакцией д.т.н. Е.А. Барабановой, д.т.н. К.А. Вытовтова

Москва
ИПУ РАН
2025

Russian Academy of Sciences (RAS)
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
of RAS (ICS RAS)
Francisk Skoryna Gomel State University
V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of RAS (IREE RAS)
Astrakhan State Technical University (ASTU)
Moscow Power Engineering Institute (MPEI)

Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2025)

Proceedings of the 9th International Scientific Conference
(ICCT-2025)
(October 7-11, 2025, Gomel, Belarus)

Under the general editorship of D.Sc. E.A. Barabanova, D.Sc. K.A. Vytovtov

Moscow
ISC RAS
2025

УДК [004+621.39]:061.3
ББК [32.97+32.88]я431
И 74

Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2025) = International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2025) : материалы IX Междунар. научн. конфер., 7–11 октября 2025 г., Гомель / под общ. ред. Е.А. Барабановой, К.А. Вытовтова; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук Минобрнауки РФ – Электрон. текстовые дан. (1 фай: 23,8 Мб).- М.: ИПУ РАН, 2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Windows XP/7/8, Acrobat Reader 4.0 или выше. – Загл. с экрана. – ISBN 978-5-91450-284-0. – Текст : электронный.

В сборник вошли материалы IX Международной научной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2025). На конференции были рассмотрены вопросы, касающиеся перспектив развития научного приборостроения в телекоммуникационных и управляющих системах, биомедицинской информатики, аппаратного и программного обеспечения информационно-коммуникационных систем, надежности, диагностики и неразрушающего контроля, систем управления и автоматизации, цифровых экосистем, управления производством и логистикой, методов математического моделирования физических процессов и материалов для инфокоммуникационных систем.

Научное издание предназначено для специалистов в области технических средств систем управления и телекоммуникаций, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Материалы изданы в авторской редакции

Утверждено Программным комитетом конференции

ISBN 978-5-91450-284-0
© ИПУ РАН, 2025

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели организационного комитета

Д. А. Новиков,
Акад. РАН, ИПУ РАН, Российская Федерация
И. Ю. Квятковская,
проф., АГТУ, Российская Федерация
С. А. Хахомов,
проф. ГГУ им. Ф.Скорины, Беларусь

Заместители

К. А. Вытовтов,
д.т.н., ИПУ РАН, Российская Федерация
Е. А. Барабанова,
д.т.н., ИПУ РАН, Российская Федерация
Д. Л. Коваленко,
к.ф.-м.н., ГГУ им. Ф.Скорины, Беларусь

Члены организационного комитета

С. А. Волкова,
к.ф.-м.н., ИПУ РАН, Российская Федерация
А. В. Воруев,
к.т.н., ГГУ им. Ф.Скорины, Беларусь
О. М. Демиденко,
д.т.н., ГГУ им. Ф.Скорины, Беларусь
В. К. Драгунов,
проф., НИУ МЭИ, Российская Федерация
М. Г. Иванов,
инженер, ИПУ РАН, Российская Федерация
Д. В. Козырев,
к. ф.-м. н., ИПУ РАН, Российская федерация
Н. С. Мальцева,
к.т.н., АГТУ, Российская Федерация
А. В. Новочадова,
м.н.с., ИПУ РАН, Российская Федерация
В. Э. Пожар,
проф., НТЦ УП РАН, Российская Федерация
А. Л. Самофалов,
к.ф.-м.н., ГГУ им. Ф.Скорины, Беларусь
И. В. Семченко,
чл.-кор. НАН Беларуси, ГГУ им. Ф. Скорины, Беларусь
И. В. Сысоев,
д.ф.-м.н., СГУ, Российская Федерация
М. В. Сысоева,
к.ф.-м.н., СГТУ, Российская Федерация
Е. В. Шалимова,
к.т.н., МЭИ, Российская федерация
М. В. Щербаков,
проф., ВГТУ, Российская Федерация

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель программного комитета

Д. А. Новиков,
акад. РАН, ИПУ РАН,
Российская Федерация

Сопредседатели программного комитета

К. А. Вытовтов,
д.т.н., ИПУ РАН, Российская Федерация
Е. А. Барабанова,
д.т.н., ИПУ РАН, Российская Федерация

Состав программного комитета

Т. Атанасова,
проф., София, Болгария
П. А. Белов,
проф., ИТМО, Российская Федерация
В. М. Вишневский,
проф., ИПУ РАН, Российская Федерация
А. В. Дворкович,
чл.-кор. РАН, МФТИ, Российская Федерация
О. И. Дранко,
проф., ИПУ РАН, Российская Федерация
Дхармараджи Селвамутху,
проф., Индийский университет технологии Дели, Индия
Зоугди Саид,
проф., Университет Париж Юг, Париж, Франция
И. Ю. Квятковская,
проф., АГТУ, Российская Федерация
У. Кригер,
проф., Бамберг, Германия
А. Кришнамурти,
проф., Коттаям, Индия
Н. А. Кузнецов,
акад. РАН, ИРЭ РАН, Российская Федерация
Р. Кумар,
проф., Университет науки и технологии Намибии, Намибия
Р. В. Мещеряков,
проф., ИПУ РАН, Российская федерация
С. А. Никитов,
акад. ИРЭ РАН, Российская Федерация
И. В. Семченко,
чл.-кор. НАН Беларуси, ГГУ им. Ф. Скорины, Беларусь
Пагано Микеле,
проф., Пизанский Университет, Пиза, Италия
О. Третьяков,
проф., Сидней, Австралия
С. А. Хахомов,
проф., ГГУ им. Ф. Скорины, Беларусь
С. Чакраварти,
проф., Флинт, США
Д. В. Чуриков,
проф., НТЦ УП РАН, Российская Федерация
М. В. Щербаков,
проф., ВГТУ, Российская Федерация

Содержание

Секция 1. Научное приборостроение систем управления и связи 17

Моделирование электрических сил, управляющих движением геликазы в системе с двойной спиралью ДНК, с учётом базы данных для белков
И. В. Семченко, И. С. Михалко, П. В. Сомов и др. 18

Problems and methods of blood glucose control systems automation
K. V. Pozhar, E. L. Litinskaia 21

Разработка методики идентификации и количественного определения микро- и наночастиц пластика в водных средах с использованием флуоресцентного мечения и анализа траекторий наночастиц
П. А. Монахова 24

Алгоритм автоматической разметки тета-ритмов с использованием вейвлет-преобразования Морле
А. А. Грищенко, А. С. Джафарова, А. Ю. Долинина и др. 27

Импульсно-вихретоковый преобразователь для контроля внутренней поверхности промысловых трубопроводов
Е. А. Славинская, В. П. Лунин, А. К. Шепелев 30

Проектирование прибора для оценки уровня коррозии арматуры в железобетонных конструкциях
И. М. Боготов, В. П. Лунин 33

Исследование характеристик трёхкаскадного микроструйного генератора планарной конструкции с характеристическим размером 100 мкм
М. П. Калибабчук 36

Управление балансом массообмена при автоматизированном перитонеальном диализе
Н. М. Жило, К. В. Пожар 39

Автоматизированный подход к анализу паттернов при лимбической эпилепсии у крыс
А. С. Джафарова, А. А. Грищенко, Е. М. Сулейманова 42

Динамические изменения функциональной связности при развитии распространяющейся деполяризации в коре головного мозга
Д. А. Лачинова, М. П. Смирнова, И. В. Сысоев и др. 44

Поиск дельта- и тета-ритмов в радиотехнической модели таламо-кортикальной сети из осцилляторов ФитцХью-Нагумо
Н. М. Егоров, М. В. Сысоева, И. В. Сысоев и др. 47

Исследование возбудимого режима дискретной рекурсивной модели нейрона
Д. И. Большаков, Д. В. Чиндарев, В. В. Матросов 49

Оценка точности алгоритмов определения ориентации вращающегося объекта с кодовыми маркерами на основе инструментальных измерений
Е. В. Иванова, Д. В. Еремин, А. Ю. Поройков 52

Прогнозирование сердечно-сосудистых событий по данным цифровой электрокардиографии
А. В. Фролов, Т. Г. Вайханская, А. П. Воробьев т др. 54

Идентификация математической модели электронного нейрона по экспериментальным сигналам
И. В. Сысоев, Л. В. Такаишвили, В. И. Пономаренко 57

Исследование коэффициента отражения радиоволн от водного раствора с примесями соли в емкости соизмеримой с длиной волны
Д. А. Овчинников, С. А. Баранов, Н. М. Барбин и др. 60

Электрохимические датчики механических движений на основе углеродных микроструктур для медицинских применений
В. М. Агафонов, В. В. Левчук, И. В. Егоров 63

Система электромагнитного мониторинга объектов критической инфраструктуры L, S, C диапазонов частот
К. А. Вытовтов, М. Г. Иванов 66

Моделирование бесконтактной системы мониторинга жизненно важных показателей человека и анализ полученных результатов с использованием нейронных сетей в математической среде Engee
Д. А. Балакин, М. Р. Акмалов, А. Р. Горбунов 69

Зависимость мощности и сдвига центральной частоты спектра рассеяния Бриллюэна от изменения модуля Юнга
Э. В. Гармаева, Н. И. Горлов, Е. Т. Китова 72

Математическая модель преобразователя частоты в нейронных ансамблях таламокортикальной системы мозга
М. В. Сысоева, А. А. Капустников, И. В. Сысоев 75

Двумерная теория акустооптической модуляции световых пучков на основе кристалла $NaBi(MoO_4)_2$
Г. В. Кулак, П. И. Ропот, Л. А. Тозик 78

Использование методов частотно-временного анализа для разметки тета- и дельта-ритмов в записях локальных потенциалов мозга
А. Ю. Долинина, М. В. Сысоева, Е. М. Сулейманова и др. 81

Применение импульсного вихретокового метода для определения электрической проводимости скрытых металлических объектов
Р. О. Белокопытов, В. П. Лунин, М. Е. Дёминова 84

Количественная оценка параметров коррозии под изоляцией с помощью вихретокового преобразователя с П-образным сердечником
М. Е. Дёминова, В. П. Лунин, Р. О. Белокопытов 87

Математическая модель задачи транспортных перевозок
С. А. Волкова, К. А. Вытовтов 90

Микроволновый волноводный метод измерения физических свойств диэлектрической жидкости
А. С. Совлуков 91

Information entropy of partially coherent light in a graded-index waveguide
N. I. Petrov 94

Наблюдение фотонного спинового эффекта Холла в субволновых решетках: влияние материала и поляризации излучения
Н. И. Петров, Ю. М. Соколов, В. В. Стоякин и др. 97

Оптимальное управление IT-проектом с использованием нейро-нечетких моделей
О. М. Проталинский, А. А. Ханова, Р. С. Гаврилов 100

Использование нейросети для стабилизации углового положения ИСЗ
К. А. Орехов, В. Ю. Сахаров, А. А. Тихонов 102

Нейросетевое обнаружение ключевых точек для автоматизации контроля качества на производстве
Г. А. Альгашев, И. А. Лёзин 105

Нейросетевая диагностика технического состояния теплоэнергетического оборудования на основе эксплуатационных параметров
О. М. Проталинский, А. В. Андрюшин, Ю. Ю. Ягупова и др. 108

Секция 2. Технические средства инфокоммуникационных технологийи систем связи 110

Методы исследования устойчивости систем жизнеобеспечения к природным воздействиям
Г. Г. Гребенюк, Л. А. Середа 111

Development of an omnichannel contact center model with chatbot service time
M. S. Stepanov, V. G. Popov 115

Метод выполнения арифметических операций над числами в конечных полях характеристики 2 и его применение в криптографии
М. А. Баранчик, Е. Г. Крупенич, С. А. Мигалевич 118

Индексные нейронные сети
А. М. Михайлов, М. Ф. Каравай 121

Распределенные вычисления в неблокируемых системных сетях
В. С. Подлазов 126

Мониторинг прибрежной зоны на основе классификации движения водного транспорта для повышения безопасности на воде
Т. Я. Гладких, А. В. Графенков, К. Д. Русаков 131

Study of recurrent super-resolution algorithm in low element antenna array
V. N. Ratushnyak, D. D. Dmitriev, I. V. Tyapkin, et al. 133

Разработка метода построения расписания доставки грузов с использованием беспилотных летательных аппаратов
А. В. Галицкая, В. А. Галузин 137

Исследование устойчивости системы связи при воздействии помех с использованием модели СМО с отрицательными заявками
Е. А. Барабанова, А. Д. Корнеев 140

Анализ устойчивости объекта информационной инфраструктуры с использованием модели СМО с ненадежным прибором
Е. А. Барабанова, М. А. Филонова 143

Mathematical model of a nonlinear M/M/1/n queueing system
K. A. Vytovtov, A. V. Novochadova 148

Проектирование хаотических аттракторов
С. А. Волкова, К. А. Вытовтов 150

Исследование устойчивости вычислительного центра системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА
Е. А. Барабанова, К. А. Вытовтов, С. Э. Казаков 151

Комбинированный метод цифрового предыскажения для усилителя мощности
Хоанг Ван Туан 153

Имитационное моделирование процесса функционирования парка пассажирских электробусов
С. И. Шеховцов, Е. С. Шеховцова, Р. С. Ловчев и др. 156

Устройство анализа датчиков системы пожаротушения в сфере Интернет вещей
А. Ю. Трофимов, А. Н. Ушков, В. С. Фланден и др. 159

Исследование задержек передачи FPV-видеопотока через геостационарную систему спутниковой связи
А. А. Березкин, А. А. Ченский, З. В. Кулунчаков и др. 161

Использование искусственных нейронных сетей в бинарной классификации ECH-трафика
К. В. Сапожников, А. С. Заварукин, А. А. Лазарев и др. 164

5G MIMO CSI Data compression methods
D. R. Lysenko, V. O. Piskovski 168

Защита от side-channel атак в микропроцессорах
Д. А. Защепко, С. Н. Барсукевич, И. С. Тарасюк 170

Successive convex approximation for enhancing federated learning over GEO satellite networks
Phuc Hao Do, Tran Duc Le, A. Berezkin, et al. 174

Исследование эффективности помехоустойчивости комбинации сверточного кодирования Витерби с STBC для систем MIMO
Нгием Ван Донг 179

Двухрезонаторный полосовой фильтр на базе ПЭДВ в КВЧ диапазоне
В. В. Крутских, А. Н. Ушков, А. Ю. Трофимов и др. 182

Большие языковые модели с поддержкой рассуждений в задаче анализа безопасности программного кода
В. В. Швыров, Д. А. Капустин, Р. Н. Сентяй 185

Применение сгенерированных искусственным интеллектом изображений: перспективы и проблемы
О. В. Блинова, И. К. Никитин 189

Исследование характеристик узла дискового диэлектрического резонатора и ПЭДВ в КВЧ диапазоне
В. В. Крутских, А. Н. Ушков, А. Ю. Трофимов 191

Security testing of information systems using artificial intelligence
V. V. Vaskevich, M. A. Vinokurov, T. A. Melnikova, et al. 194

Некоторые тенденции разработок и применения беспилотных авиационных систем: элементы анализа и зарубежные мнения
А. В. Рожнов 197

Дистанционная диагностика дефектов подшипника микроволновым датчиком вибраций
Д. В. Хаблов 202

Characterization of simulation models of complex systems
O. M. Demidenko, A. V. Varuyeu, E. V. Rafalava, et al. 207

Разработка и создание клиент-серверного приложения на языке C++/Qt
А. А. Быстревский, С. А.Лукашевич 210

Formalization of the computational process in a local area network node using informative coloring of user resource requests
O. M. Demidenko, V. N. Kulinchenko, Y. M. Nikitjuk, et al. 213

Геоинформационные системы нового поколения и криптовалюта оцифрованных пространств
А. Н. Мигачев 216

Экономическое обоснование эффективности использования нейронных сетей для автоматического определения и исправления ошибок в программном коде
Э. В. Синяева, А. В. Боднар 219

Применение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ после СВО
О. В. Кудрявцева, М. А. Кудрявцева 224

Трудоустройство лиц с ОВЗ – актуальная задача в условиях развития цифровой экономики
О. В. Кудрявцева, М. А. Кудрявцева 227

Применение принципа управления по прогнозу регулируемой величины в линейных системах автоматического регулирования
Г. А. Пикина, Д. М. Суслов, Ф. Ф. Пащенко 230

Мониторинг состояния животных на основе профиля двигательной активности
С. В. Кулешов, А. А. Зайцева, Е. А. Черкашин 237

Обоснование применения имитационных моделей на основе данных телеметрии как метода оценки состояния
А. В. Андрюшин, А. В. Неклюдов, Ю. Ю. Ягупова и др. 240

Обработка и получение характеристики надежности турбоагрегата Т-100 основанной на малой выборке
А. В. Андрюшин, О. М. Проталинский, Ю. Ю. Ягупова и др. 243

«Тепловые испытания газотурбинной установки 9FB фирмы General Electric на ПГУ «Хаджрет Эннус»
А. В. Андрюшин, Э. К. Аракелян, А. В. Неклюдов и др. 246

Экономическое обоснование внедрения инновационных решений в области физики для компьютерных игр: анализ затрат, выгод и сроков окупаемости
А. В. Григорьев, А. В. Синяев 249

Классификация COVID-19 на основе флюорографии с использованием сверточных нейронных сетей (CNN)
С. А. Волкова 252

GRID Didn't Take Off, But Is There a Chance?
R. Smelyanskiy 253

Алгоритм устойчивой кластеризации RR-LEACH для повышения производительности беспроводных сенсорных сетей
Е. А. Евстифеева 257

Robotic aspects and intelligent navigation of medical instruments in invasive procedures
O. M. Gerget, T. G. Naumchik 260

Секция 3. Цифровые экосистемы, управление производством и логистикой 263

Человекоцентричные архитектуры киберфизических производственных систем на основе цифровых двойников
М. В. Зенькович 264

Разработка маршрутной технологии изготовления изделий распределенного приборостроительного производства
М. В. Пономаренко, Ю. С. Андреев, И. А. Волков 267

Применение прецедентного подхода для назначения технологических режимов при изготовлении полимерных изделий методом литья под давлением
А. В. Чукичев, Ю. С. Андреев 270

Визуальные языки и методы моделирования бизнес-процессов
Г. Н. Калянов 274

Оценка индивидуальных психологических характеристик сотрудника при формировании групп для выполнения сложных и ответственных задач в экстремальных условиях
Е. Б. Новикова, М. П. Фархадов, В. В. Скопин 277

Опережающая стандартизация в цифровых системах автоматизации технологических процессов
Е. В. Юркевич, Л. Н. Крюкова 281

Методы анализа фрагментов научных публикаций, плохо поддающихся распознаванию: таблицы, графики, изображения
Е. Ю. Давыдов, С. А. Мальгина, М. П. Фархадов и др. 285

Подготовка IT-специалистов к разработке AI-решений для цифровых экосистем производства и логистики
Е. Ю. Суворова, Д. А. Капустин, Р. Н. Сентяй 287

Специфика расчетов экономической эффективности ограничения когнитивной сложности IDEF0-диаграмм
А. В. Григорьев, В. К. Ремизов 290

Методы анализа эффективности буровых работ и их программные реализации
Н. В. Пальчунов, А. А. Жигар, Г. В Чекан 293

Структурные сдвиги в машиностроении: анализ быстрорастущих организаций
О. И. Дранко, А. Ф. Резчиков 296

Обзор математических проблем, несовместимостей и противоречий в прикладных моделях оптимизации планирования и управления в нефтегазовой отрасли
П. А. Шлепаков 299

Digital ecosystem and corporate production management mechanism
V. Tsyganov 303

Драйверы внедрения цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ: российский и зарубежный опыт
О. В. Кудрявцева, М. А. Кудрявцева 305

Секция 4. Материалы для инфокоммуникационных систем 309

Applying multi-objective genetic algorithm (MOGA) to optimize synthesis parameters of dielectric Sol-Gel coatings for microelectronics
V. V. Vaskievich, D. L. Kovalenko, Yu. V. Nikityuk, et al. 310

Evaluation of mechanical properties of C_{60}-fullerene reinforced Ti_3Al under uniaxial tensile deformation: a molecular dynamics study
A. S. Narseev, E. A. Shchepilov, O. G. Komissarenko, et al. 313

Активная 5×5-элементная метаповерхность с функцией управления фазой для приложений в Ka-диапазоне частот
И. А. Фаняев, А. А. Тимошенко, А. Л. Самофалов и др. 316

Photoelectric characteristics of the photodiode structure Al/ZnO:MgO/p-Si/Al
V. V. Malyutina-Bronskaya, A. V. Semchenko, V. V. Sidski, et al. 319

Нейро-нечеткое моделирование лазерного легирования стали 30ХГСН2А
Ю. В. Никитюк, А. Г. Баевич, А. В. Максименко и др. 322

Обеспечение стабильности технологических процессов изготовления деталей приборов
С. А. Братчиков, Ю. С. Андреев 325

Оценка пористости покрытий деталей после газопламенного напыления методом статистической сегментации изображений
Ю. С. Яковлев, Ю. В. Бруттан 327

Испытания спроектированного импульсно-вихретокового устройства для контроля коррозии ферромагнитных труб
А. К. Шепелев, А. М. Добренко, В. П. Лунин 329

Секция 5. Системы управления и автоматизации 332

Распространение сейсмических волн и исследование плазменно-импульсного воздействия на горные породы
А. Ф. Пащенко 333

Stochastic identification of heat energy consumption by multi-storey residential buildings based on commercial accounting data
O. V. Stukach, D. V. Kutuzov, A. V. Osovsky, et al. 336

Релейное управление перевернутым маятником на подвижной тележке при воздействии силы сухого трения
С. А. Кочетков, С. А. Олимова 338

Method of mutual navigation of drones in a swarm
D. D. Dmitriev, E. D. Mikhov, A. V. Lykho 341

Оценка параметров положения и движения объекта при линейном и нелинейном сглаживании
А. Е. Якушина, И. Л. Щербов, В. В. Паслён 344

Determination and optimization of the parameters of the technological operation of two-beam laser cutting of silicate glass using a genetic algorithm and neural networks
V. A. Prokhorenko, Yu. V. Nikityuk, V. S. Smorodin, et al. 348

Определение параметров лазерного раскалывания кристаллического кварца с использованием нейро-нечетких сетей
Ю. В. Никитюк, Л. Н. Марченко, Х. Чжан и др. 351

Распознавание режимов формирования трещины при лазерном термораскалывании с использованием сверточных нейронных сетей
Ю. В. Никитюк, В. А. Прохоренко 354

Метод комбинирования машинного обучения и статистического анализа в задаче мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов
А. М. Астахов 357

Software application for identifying micro-hydroelectric power plant locations, taking into account the landscape and climatic characteristics of the region
P. Yu. Buchatskiy, D. A. Atagyan, S. V. Onishchenko, et al. 360

Синтез управления нелинейным динамическим объектом с обратной связью с предысторией
К. Р. Айда-заде, В. А. Гашимов 363

Zonal feedback control of the heat conduction process by means of lumped sources
K. R. Aidazade, S. Z. Guliyev 366

Формирование виртуального пространства для обучения лётчиков решению навигационных задач при полётах на авиационном тренажёре
В. Р. Роганов, М. Ю. Михеев, Б. С. Долговесов и др. 369

An approach to integrating software systems based on a fuzzy rule base using the PLM complex data bus
L. Kamaletdinova, A. Romanov, T. Istyukov, et al. 372

Проектирование следящей модели для динамического сглаживания примитивных траекторий мобильных роботов в реальном времени
Л.Г. Ли, Ю.Г. Кокунько 375

Стенд для исследования скоростных и энергетических характеристик микротурбины со струйно-мембранной системой управления
П. А. Тимошев 378

О запасах управления до наступления предельных состояний на примере малого подводного аппарата
И. Ю. Липко 381

Разработка системы прогнозирования состояния посева сельскохозяйственной культуры на разных фазах развития растения
П. О. Скобелев, А. А. Галузин 384

Алгоритм построения аналогового отпечатка устройства нижнего уровня автоматизированной системы на основе параметров его сигнала
Д. Н. Богачева, О. В. Лукинова, А. А. Рощин 387

К задаче моделирования визуально наблюдаемого виртуального пространства, синтезированного имитаторами авиационного тренажёра
В. Р. Роганов, Б. С. Долговесов, С. Хилал и др. 389

LMI conditions for parameters of one robust control algorithm
A. V. Imangazieva 393

Автоматическое определение положения долота при бурении горизонтальных скважин с помощью алгоритма RVM
И. А. Щербаков, О. Н. Кочуева 395

Синтез алгоритмов управления для модели вертолета на основе линейных и нелинейных методов
С. А. Кочетков, Д. А. Нефедов 398

Разработка силового блока управления нагрузочным генератором экспериментальной установки для исследования колебаний судового валопровода
Г. А. Кушнер, К. А. Климкин, Н. А. Иванков и др. 400

Моделирование рабочего колеса микротурбины для струйно-мембранной системы управления колесным транспортным средством
А. А. Кваша 404

Идентификация дефектов технологических объектов управления с использованием методов искусственного интеллекта
Н. Г. Герасимов, О. М. Проталинский 406

Интеллектуальный модуль автоматического управления с адаптацией к параметрам объекта на примере навигационного комплекса БПЛА
П. М. Трефилов 409

Моделирование процесса аэрозольной обработки местности автономным квадрокоптером
С. А. К. Диане 412

Нечеткая модель Такаги-Сугено в задаче прогнозирования электропотребления инжекционной машины термопластавтомата ТПА
Е. С. Дуванов, А. Ф. Пащенко, И. Ю. Кудинов 415

Об оптимизации электродинамической системы угловой стабилизации КА
с помощью метода роя частиц при наличии постоянно действующих возмущений
М. В. Максименко, К. Г. Петров, А. А. Тихонов 417

Using Gazebo simulator for mobile robotics research: a case study
of a crawler robot model development
A. Dobrokvashina, T. Gamberov, R. Lavrenov, et al. 423

Digital human modeling for computer vision algorithms evaluation in Gazebo:
a case study on human tracking
T. R. Gamberov, R. N. Safin, E. V. Chebotareva, et al. 426

Optimization of random step environment structure generation for LIRS-RSEGen-2
in the Gazebo simulator
R. Gabdrahmanov, A. Zagirov, T. Tsoy, et al. 429

Modelling and dynamic analysis of a humanoid robot with the Denavit-Hartenberg method
S. Sulaiman, N. Imamov, A. P. Sudheer, et al. 432

Coverage of an agricultural area by unmanned aerial vehicles considering external
and internal constraints
R. Faizullin, M. Mustafin, M. Svinin, et al. 436

Применение импульсного вихретокового метода для определения
электрической проводимости скрытых металлических объектов
Р. О. Белокопытов, В. П. Лунин, М. Е. Дёминова 439

Секция 6. Математические методы и модели 442

Анализ ресурсной СМО MMPP+2MMPP)$^{(v)/)}$/M/∞в условии предельно редких
изменений состояний случайной среды
С. П. Моисеева, Е. В. Панкратова 443

AI and ML-based modeling of stochastic longitudinal vibrations in a viscoelastic rope
with dynamic boundaries
V. L. Litvinov, K. V. Litvinova, A. V. Tarakanov, et al. 447

Reliability study of local navigation system for tethered UAV
N. Ivanova, N. Kalmykov 449

Применение приближенных методов для решения задач оптимизации расписаний
представленных в рекурсивном виде
Б. В. Куприянов, А. А. Рощин 452

Обобщенная квадратичная задача о назначении (GQAP) и ее применение
для проектирования распределенной системы управления БПЛА
В. К. Акинфиев 454

Модель СМО с нетерпеливыми заявками для анализа переходных режимов в медицинских
информационно-измерительных системах с неоднородными приборами
А. Г. Дворецкий, Е. А. Барабанова 458

Information spreading in random graphs evolving by Norros-Reittu model with node deletion
M. N. Markovich, D. V. Osipov 461

On c-matrix method for bounding the rate of convergence for nonstationary queueing systems
A. I. Zeifman, I. A. Usov, A. L. Kryukova, et al. 463

Transient analysis of a finite source computer queueing network
S. A. Vostokova, Ya. A. Sergienko, A. I. Zeifman 465

Исследование переходного режима трехфазной СМО при изменении интенсивностей обработки заявок
К. А. Вытовтов, Е. В. Шабанова 467

Variance reduction in floating random walk capacitance extraction
A. S. Rusakov, A. S. Sipin, A. N. Kuznetsov, et al. 470

К задаче моделирования визуально наблюдаемого виртуального пространства синтезированного имитаторами авиационного тренажёра
В. Р. Роганов, Б. С. Долговесов, С. Хилал и др. 474

Методы исследования устойчивости транспортной инфраструктуры при возникновении чрезвычайных ситуаций
Е. А. Барабанова, А. Л. Ковалев 477

Секция 7. Школа молодых ученых: «Перспективные направления развития технологий управления и связи» 481

Мультиагентный алгоритм формирования микросетей в автономных электроэнергетических системах
С. П. Ковалёв, А. И. Полюхович 482

Разработка модели интегрального термоанемометра
А. А. Сухоруков 485

Исследование передаточных характеристик микроструйного расходомера на основе семикаскадного генератора
А. А. Мамонтова 488

Реализация и процесс разработки системы распознавания лиц на языке Python
Ю. В. Лещинская, С. А. Лукашевич 491

Методы, библиотеки и среды для анализа данных с использованием машинного обучения
М. С. Загорникова, С. А. Лукашевич 494

Модификация механизма комплексного оценивания рисков сложных организационных систем для обоснования выбора пар компонентов для агрегации
А. С. Рей 497

Structural and parametric design of memristive biosensors
V. M. Zaripova, I. Yu. Petrova, D. M. Gimatdinov 500

Исследование возможности снижения размерности задачи нахождения критических вершин в графе
А. А. Крыгин, С. М. Тарасова 503

Нейросетевой анализ визуальных данных подводной инфраструктуры в информационно-измерительной системе мониторинга
Г. К. Тевяшов 506

Современные методы адаптивного управления в автоматизированных системах
Л. П. Скрипко, А. А. Скрипко 509

Моделирование передачи управляющего сигнала в скоплениях биологических объектов
Д. В. Железняков, Ю. А. Головко, А. М. Лихтер 513

Разработка микроструйного устройства синхронизации на основе 4-разрядного счетчика в интегральном исполнении
Л. Ю. Дуда 517

Модель надежности системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА
Е. А. Барабанова, К. А. Вытовтов, М. Г. Иванов 520

Секция 1

Научное приборостроение систем управления и связи

Scientific instrumentation in telecommunication and control systems

Моделирование электрических сил, управляющих движением геликазы в системе с двойной спиралью ДНК, с учётом базы данных для белков

И. В. Семченко[1], И. С. Михалко[2], П. В. Сомов[2], А. Л. Самофалов[2]
[1]Государственное НПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
г. Минск, Республика Беларусь,
[2]Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь,
semchenko@oelt.basnet.by, samofalov@gsu.by

***Аннотация**. В работе исследуются электрические силы, управляющие движением геликазы в процессе репликации ДНК. Геликаза, ключевой фермент, разделяющий нити двойной спирали, моделируется как электрический диполь с параметрами, полученными из анализа белковых структур. Методом численного моделирования рассчитаны силы взаимодействия между диполем геликазы и нитями ДНК, рассматриваемыми как идеальные проводники. Результаты демонстрируют наличие силы, направленной к вершине вилки, что подтверждает значимость электромагнитных эффектов в механизме репликации. Работа подчёркивает необходимость учёта электрических взаимодействий в исследованиях молекулярной динамики ДНК и открывает перспективы для более детального моделирования с учётом реальных проводящих свойств биомолекул.*

I. Введение

Исследования различных аспектов процесса репликации ДНК, в том числе механических, являются очень актуальными. Например, опубликована статья учёных Корнельского университета (США), в которой рассматриваются механические и топологические свойства хроматина, позволяющие разделять нити ДНК без их запутывания [1]. Исследуется возможное расположение сверхспирализации относительно движущейся реплисомы, при котором происходит мягкое разделение нитей и репликация ДНК без повреждения генов.

Однако особенности электромагнитных сил, действующих в процессе репликации ДНК, остаются за пределами статьи [1], как и многих других статей, в которых рассматриваются преимущественно биохимические свойства ДНК. В то же время, на молекулярном уровне, в нанометровом масштабе макромолекулы ДНК электромагнитные силы имеют неоспоримый приоритет перед другими известными взаимодействиями, существующими в природе. В статьях [2,3] исследованы силы, возникающие в нитях двойной ДНК-подобной спирали под действием световой волны при условии полуволнового резонанса.

В данной работе рассматриваются электрические свойства белка геликазы (helicase), который является важным ферментом при репликации молекулы ДНК. Выполняется моделирование электрических сил, управляющих движением геликазы в системе с двойной спиралью ДНК, с учётом базы данных для белков.

II. Формулы и рисунки

На первом этапе путём теоретического анализа необходимо определить эффективные параметры взаимодействия геликазы с молекулой ДНК при раскручивании двойной спирали. Такой анализ можно провести, с одной стороны, на основе известных характеристик молекулы ДНК [4,5], и с другой стороны, с использованием базы данных для белков, в том числе их электрических характеристик [6]. На первом этапе исследований в качестве электрического дипольного момента геликазы можно использовать среднее значение для белков $P_{hc} = 639Д = 2{,}13 \cdot 10^{-27}$Кл · м [6], где *Д* означает единицу измерения дебай, индекс *hc* означает принадлежность к геликазе. В общем

случае, электрические заряды могут быть распределены в объёме геликазы сложным образом. Используя в качестве первого приближения простейшую модель – электрический диполь, можно найти расстояние l_{hc} между точечными зарядами диполя $\pm q_{hc}$ (плечо диполя) $l_{hc} = P_{hc}/q_{hc}$. Согласно базе данных [6], среднее значение радиуса белков равно $R_{pr} = 40$ нм, где индекс pr означает принадлежность к белкам - proteins. Принимая, в качестве оценки, плечо диполя геликазы равным среднему диаметру белков, получаем значения заряда диполя, меньшие элементарного заряда. Такой результат не имеет физического смысла, поскольку электрические заряды диполя должны быть кратными элементарному заряду. Следовательно, расстояние между зарядами диполя геликазы должно быть меньше среднего диаметра белков, то есть должно выполняться неравенство $l_{hc} < 2R_{pr}$. Как будет показано ниже, плечо диполя геликазы должно быть сравнимо с характерными размерами двойной спирали ДНК, поскольку геликаза находится вблизи вершины репликационной вилки и её дипольный момент оказывает эффективное воздействие в процессе разделения двойной спирали.

По предварительным оценкам, $q_{hc} = (2 \div 3) \cdot e$, где e – элементарный заряд. Для дальнейших вычислений принимаем электрические заряды диполя геликазы равными двойному элементарному, то есть $q_{hc} = 2e = 3{,}2 \cdot 10^{-19}$Кл. Тогда расстояние между зарядами в электрическом диполе геликазы принимает значение $l_{hc} = 6{,}6$ нм. Такое плечо дипольного момент имеет один порядок величины с радиусом двойной спирали $r = 1$ нм, шагом h= 3,4 нм и длиной витка $P = 7{,}14$ нм [4,5], что свидетельствует о соответствии характерных параметров геликазы и двойной спирали, взаимодействующих между собой.

Рассматривая геликазу с приведенными выше параметрами вблизи вершины репликационной вилки, можно вычислить предельно близкое расстояние между центром диполя геликазы и вершиной вилки:

$$|x| \geq \left(l_{hc} + \frac{r}{cos\beta}\right) \cdot \frac{1}{tg\beta} \qquad (1)$$

где x – координата центра диполя, ось OX совпадает с осью двойной спирали, начало координат находится в вершине вилки, поэтому x принимает отрицательные значения, 2β – угол между спиральными нитями при вершине вилки. Данная формула остаётся корректной даже в предельном случае $l_{hc} \to 0$, что соответствует большим значениям зарядов диполя геликазы, тогда $|x| \geq {}^{r}/_{sin\beta}$, то есть диполь не может приблизиться непосредственно к вершине вилки, поскольку разделённые нити ДНК имеют спиральную структуру. Используя $l_{hc} = 6{,}6$ нм , значение угла $\beta = 45°$ и указанные выше параметры двойной спирали ДНК, по формуле (1) получаем расстояние между геликазой и вершиной вилки$|x| \geq 4{,}7$ нм. Такое расстояние соответствует характерным параметрам геликазы и двойной спирали и подтверждает их эффективное взаимодействие.

На втором этапе работы проведено численное моделирование сил электрического взаимодействия геликазы с ДНК-подобной двойной спиралью.

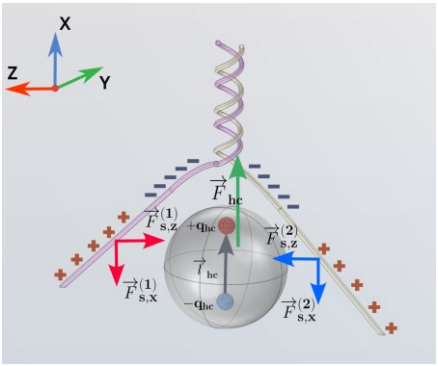


Рис. 1. Модель геликазы вблизи вершины репликационной вилки.
Дипольный момент геликазы направлен вдоль оси двойной спирали (вертикально).
Индекс s означает принадлежность к нити – strand

Расстояние от вершины репликационной вилки до центра геликазы $|x| = 4{,}8$ нм, что соответствует формуле (1). Взаимное смещение спиральных нитей вдоль оси X равно $x_s = 0{,}5$ нм [5]. В первом приближении спиральные нити рассматривались как идеальные проводники.

Расчёты показывают, что электрический диполь геликазы индуцирует на спиральных нитях электрические заряды (они показаны на рис. 1 знаками «плюс» и «минус» вблизи нитей ниже вершины репликационной вилки). В результате взаимодействия зарядов дипольного момента геликазы $\pm q_{hc}$ и индуцированных зарядов возникает сила $\vec{F}_{hc}$, движущая геликазу к вершине репликационной вилки. Получены значения компонент сил, действующих на геликазу, первую и вторую спиральные нити, эти значения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Компоненты сил, действующих на геликазу, первую и вторую спиральные нити

Компоненты сил	Компоненты силы, действующей на геликазу	Компоненты силы, действующей на первую спиральную нить	Компоненты силы, действующей на вторую спиральную нить
X-компонента, 10^{-11}Н	8,275	−2,2264	−5,8255
Y-компонента, 10^{-11}Н	2,6453	0,621	−3,2124
Z-компонента, 10^{-11}Н	−2,6049	−1,0629	3,6706

Поверка соответствия сил третьему закону Ньютона $F_{s,x}^{(1)} + F_{s,x}^{(2)} = -F_{hc,x}$, $F_{s,y}^{(1)} + F_{s,y}^{(2)} = -F_{hc,y}$, $F_{s,z}^{(1)} + F_{s,z}^{(2)} = -F_{hc,z}$ показывает, что погрешность вычислений составляет $(0{,}1 \div 2{,}7)\%$, что подтверждает точность расчётов. Для геликазы преобладающее значение имеет x-компонента силы $F_{hc,x}$, направленная к вершине репликационной вилки, которая более чем в 3 раза превышает значения y- и z-компонент сил $F_{hc,y}$ и $F_{hc,z}$.

III. Заключение

Проведенное моделирование подтверждает наличие электрической силы $\vec{F}_{hc}$, движущей геликазу к вершине репликационной вилки. Полученный результат может быть использован при более детальном описании репликации молекулы ДНК с учётом электромагнитных взаимодействий на молекулярном уровне, в нанометровом масштабе макромолекулы ДНК.

Работа выполнена в рамках ГПНИ КОНВЕРГЕНЦИЯ-2025, подпрограмма «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии».

Литература

[1] *T. T. Le, X. Gao, S. ha Park, J. Lee, J.T. Inman, J. H. Lee, J. L. Killian, R. P. Badman, J. M. Berger, M. D. Wang*, “Synergistic Coordination of Chromatin Torsional Mechanics and Topoisomerase Activity”, *Cell* 179, 2019, pp. 619-631.

[2] *I. V. Semchenko, I. S. Mikhalka, I. A. Faniayeu, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakou, S. A. Tretyakov*, “Optical Forces Acting on a Double DNA-Like Helix, Its Unwinding and Strands Rupture”, *Photonics*, 2020, 7, 83.

[3] *I. V. Semchenko, I. S. Mikhalka, A. L. Samofalov, S. A. Khakhomov*, “Controlling the Shape of a Double DNA-like Helix as an Element of Metamaterials”, *Photonics* 2024, 11, 788.

[4] *J. D. Watson, F.H.C. Crick, “A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid*”, *Nature*, 1953, 171, pp. 737-738.

[5] *J. D. Watson, T. A. Baker, S. P. Bell, A. Gann, M. Levine, R. Losick*, “Molecular Biology of the Gene”, 7th ed., *Pearson*: London, UK, 2013, 912 p.

[6] *C. E. Felder, J. Prilusky, J. L. Sussman*, “A server and database for dipole moments of proteins”, *Nucleic Acids Research*, 2007, P. 512-521.

Problems and methods of blood glucose control systems automation

K. V. Pozhar, E. L. Litinskaia
National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia,
pozhar@bms.zone

***Abstract**. The complexity of the task of blood glucose control systems automation for type 1 diabetic patients is associated with the inertia and nonlinearity of the control object, as well as the presence of complex residual natural mechanisms of internal regulation. The paper considers control methods based on feedback, predictive models, and a combination of these methods. The paper also considers efficiency metrics estimating medical and technical aspects of control. In addition, the paper considers current problems in the field of application of combined blood glucose control, including those related to the construction, identification, numerical solution and linearization of a mathematical model, optimization of control actions, mutual correction of predicted and measured blood glucose values.*

I. Introduction

The disfunction of the body's natural mechanisms for supplying cells with glucose in diabetes leads to the need to use insulin delivery systems to maintain blood glucose (BG) in a given range. Existing technical systems for BG control assume user participation both in calculating the parameters of the control action and in directly collecting feedback data, the level of external disturbances and interacting with the actuator based on these data. Such systems are characterized by low efficiency due to non-optimal control, high user load and, as a consequence, significant control errors caused by the human factor.

The task of BG control systems automation is relevant, consisting of both automation of control system elements and calculations performed, necessary for making optimal decisions. The task is complicated by both the insufficient efficiency of feedback sensors and the inertia of the control object, for which the response rate to the control action significantly exceeds the response rate to disturbances. This work is devoted to a review of developments in the field of automation of BG control and an analysis of promising areas of development in this area.

II. Blood Glucose Control

The BG control has a number of features related to the functioning of the control object. These include residual natural mechanisms for maintaining normal BG, providing, although slow, but robust control with a large number of feedbacks. The body's response to food is bimodal with a time to the peak of deviation of about 1.5 hours, with a response to subcutaneous insulin injection with a characteristic time of more than 3 hours. Thus, the control object has significant inertia, and the dynamics of the controlled and target value behaves significantly nonlinearly.

Current BG control systems generally provide discrete unidirectional control, implementing unconditional pulse control actions calculated by the patient himself, or contain an element of continuous numerical control. Systems with bidirectional control are being developed, using glucagon as a substance increasing BG [1]. Existing control methods are insensitive to external disturbances not associated with food, as well as to variations in the control object parameters. Such control has low efficiency and a low degree of automation.

A number of works consider PID controllers that provide low overshoot and good convergence, while robustness of control can be achieved by introducing hysteresis [2]. However, due to delays in feedback and inertia of the control object, such control practically does not allow reducing the peak values of the BG after meal, although it provides an acceptable overall control time. Methods operating on feedback are also being developed, including those based on fuzzy logic [3], neural networks [4], and the Kalman filter [5], which have not yet demonstrated a significant improvement in control efficiency. The greatest efficiency is shown

by methods that use predictive models in some way. The most common are lumped models built on the basis of nonlinear systems of differential equations [6, 7]. There are also linear models [8], but they are significantly inferior in accuracy.

Assessing the BG control efficiency is also a non-trivial problem, since there are no uniformly agreed metrics and criteria. The most common metric is the glycated hemoglobin value, which demonstrates mean BG value for 3 months [9], as well as the proportion of time when BG was in the normal range (TIR). Due to the fact that these metrics are obviously incomplete, they are accompanied by other statistical metrics, such as the standard deviation, the variation coefficient, etc. Some of the most substantiated metrics are the HGBI and LGBI metrics, determined using the Kovachev risk function [10], which compensates for the asymmetry of risk for the patient with BG deviations in the greater and lesser directions by the same amount. Inconsistency of the metrics used, in turn, complicates the assessment of BG control methods.

III. Current Tasks of Combined Control

Combined control, including feedforward (model predictive control) and feedback, is one of the most promising approaches to automation of the BG control systems. While feedback control, for example, based on a PI-controller, even with a feedback delay allows maintaining BG in the normal range away from external disturbances with high amplitude [2], predictive control allows early infusion of the optimal amount of insulin before the expected meal or disturbances of other classes. It is proposed to use complex nonlinear mathematical models as the core of feedforward part of control, the use of which in portable control systems becomes possible with the growth of the computing capabilities of portable medical devices. Improvement of such models due to a more correct description of physiological processes will increase the prediction efficiency of both under normal conditions and in a number of specific situations. The use of linear models or linear approximations of complex models, on the contrary, does not allow describing the bimodal nature of the object response and leads to unacceptable errors.

As such models are often rigid [7], a pressing problem is the selection of effective methods for their numerical solution. The work [11] shows the effectiveness of methods implementing automatic switching between explicit and implicit solvers. The most important problem is the calculation of the optimal control action, which is effectively solved for such models by some global optimization methods, in particular the "COBYLA" algorithm. The class of models under consideration contains a large number of parameters, only some of which are measurable or constant, which requires numerical parametric identification of the model based on experimental data. This, in turn, means that the use of a management system for a specific patient requires preliminary collection of some data. In the presence of such data, global optimization methods also show efficiency, including the "Basinhopping" algorithm with the Nelder-Mead local minimizer.

Another problem is the organization of the joint functioning of predictive control and feedback control. In a number of works, prediction is used only for short-term assessment of the BG trend. In [2], separate application of these methods is proposed depending on the presence of external disturbances. We propose to consider it as a full-fledged tool not only for calculating control actions, but also for correcting the feedback sensor readings. In this case, a method for determining the BG from two sources of information of different nature is required. An algorithm is proposed that consists of subtracting from the next segment of the prediction function the expression $(g_p\text{-}g_m)\cdot t/t_k$, where g_p is the predicted concentration for the moment of last measurement t_k, g_m is the result of the last measurement. It is shown that the resulting value has greater accuracy than both the predicted and measured values. The main advantage of using such an algorithm is the increase in the response rate of algorithms for determining violations of the system's information about external influences, since the resulting function of the BG dynamics has a smooth character and less time is needed to detect a particular trend. At the same time, the development of methods for working with two sets of data remains an important task.

IV. Conclusion

The problem of BG control automation is of high practical importance, since its solution will improve the quality of life of many people suffering from type 1 diabetes mellitus. Among the control methods potentially applicable for solving the problem, we can highlight combined model predictive control and feedback control. The current tasks in the framework of implementing such control are the improvement of mathematical models of the control object, the development of numerical solution methods, parametric identification of the model and the search for effective the control action global optimization methods. Combined control also requires the development of methods for mutual correction of measured values with a random error and predicted BG values with an accumulating error, which will allow relying on more accurate processed data when managing.

References

[1] *Haidar A, Legault L, Messier V, Mitre TM, Leroux C, RabasaLhoret R.* Comparison of dual-hormone artificial pancreas, single-hormone artificial pancreas, and conventional insulin pump therapy for glycaemic control in patients with type 1 diabetes: an open-label randomised controlled crossover trial. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2015;**3**:17–26.

[2] *Litinskaia E.L.* Development of a personalized insulin therapy system [In Russian] // *Izvestiya vuzov. Electronica.* 2021. **26**(2). pp.162–171.

[3] *Atlas E. et al.* MD-logic artificial pancreas system: a pilot study in adults with type 1 diabetes //*Diabetes care*. 2010. **33**(5). pp. 1072-1076.

[4] *Sandham, W. A., Hamilton, D. J., Japp, A., & Patterson, K.* (1998, November). Neural network and neuro-fuzzy systems for improving diabetes therapy. In *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Vol. 20 Biomedical Engineering Towards the Year 2000 and Beyond (Cat. No. 98CH36286) (Vol. 3, pp. 1438-1441). IEEE.

[5] *Nanda, A., & Patra, A. K.* (2020). Kalman filtering linear quadratic regulator for artificial pancreas in type-I diabetes patient. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, **34**(1), 59-74.

[6] *Bergman, R. N.* (2006). Minimal model: perspective from 2005. *Hormone research*, **64**(Suppl. 3), 8-15.

[7] *Dalla Man, C., Rizza, R. A., & Cobelli, C.* (2007). Meal simulation model of the glucose-insulin system. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, **54**(10), 1740-1749.

[8] *Marcus, Y., Eldor, R., Yaron, M., Shaklai, S., Ish-Shalom, M., Shefer, G., ... & Gonen, M.* (2020). Improving blood glucose level predictability using machine learning. *Diabetes/metabolism research and reviews*, **36**(8), e3348.

[9] *Nathan, D. M., Kuenen, J., Borg, R., Zheng, H., Schoenfeld, D., Heine,* R. J., & A1c-Derived Average Glucose (ADAG) Study Group. (2008). Translating the A1C assay into estimated average glucose values. Diabetes care, **31**(8), 1473-1478.

[10] *Kovatchev, B. P., Cox, D. J., Gonder-Frederick, L. A., & Clarke, W.* (1997). Symmetrization of the blood glucose measurement scale and its applications. *Diabetes care*, **20**(11), 1655-1658.

[11] *Chuprakov, D. A., & Pozhar, K. V.* (2023). Analysis of methods for calculating optimal parameters for insulin boluses in automated insulin therapy systems with control based on predictive models. *Biomedical Engineering*, **57**(2), 102-106.

Разработка методики идентификации и количественного определения микро- и наночастиц пластика в водных средах с использованием флуоресцентного мечения и анализа траекторий наночастиц

П. А. Монахова

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, г. Москва, Россия,

ООО «Айвок», Зеленоград, г. Москва, Россия,

mpolina09@mail.ru

***Аннотация**. В последние годы все большую обеспокоенность вызывает загрязнение окружающей среды микро- и наночастицами пластика. Эти загрязнители формируются в процессе разрушения более крупных пластиковых объектов и представляют значительную угрозу для водных экосистем, организмов и потенциально для человека. Традиционные подходы к их обнаружению, включая микроскопические, спектроскопические и хроматографические методы, обладают рядом ограничений. Они часто требуют дорогостоящего оборудования, сложных процедур подготовки проб и не всегда обеспечивают достаточную точность при работе с наноразмерными частицами. Работа посвящена разработке методики и экспериментальному исследованию микро- и наночастиц пластика в воде с применением флуоресцентных красителей. Разработана экспериментальная установка для реализации измерений методом анализа траекторий наночастиц (Nanoparticle tracking analysis). Предложена комплексная методика детекции микро- и нанопластика с использованием флуоресцентных красителей (Nile Red, Cy3, Cy5), обеспечивающая высокую селективность и чувствительность. Метод включает пробоподготовку, получение видеозаписей броуновского движения частиц и расчет их гидродинамических параметров. Разработанная методика может применяться для мониторинга загрязнений, исследования транслокации нанопластика и оценки эффективности методов очистки воды. Предложенный подход открывает новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований в области экологического мониторинга и оценки рисков, связанных с нанопластиком.*

I. Введение

Загрязнение водных ресурсов микро- и нанопластиком в наши дни представляет серьезную угрозу для экологической безопасности. Микро- (1 мкм–5 мм) и нанопластик (<1 мкм), образующийся в результате деградации крупных пластиковых изделий, представляет угрозу для водных экосистем, биоразнообразия и здоровья человека. Нанопластик, благодаря своим малым размерам, способен проникать в клетки живых организмов, вызывая токсические эффекты. Возможность проникать сквозь биологические барьеры и накапливаться в живых тканях вызывает особенную обеспокоенность [1].

Однако методы обнаружения и количественного анализа таких частиц, особенно в природных водах, остаются недостаточно разработанными. Существующие методы, такие как микроскопия, спектроскопия или хроматография, часто требуют сложного оборудования и не всегда обеспечивают достаточную точность для анализа наноразмерных частиц. Поэтому разработка новых методик, позволяющих эффективно контролировать размеры и концентрацию микро- и наночастиц пластика в воде, является крайне актуальной задачей.

Перспективным направлением стало сочетание флуоресцентного мечения с методом анализа траекторий наночастиц (Nanoparticle tracking analysis). Применение липофильных красителей, таких как нильский красный (NR), для окрашивания микропластика в пробах воды может позволить разделить частицы на типы на основе их общей гидрофобности или служить для оценки времени пребывания частиц в воде через изменения свойств поверхности [2].

Для определения размеров и концентрации наночастиц в жидкой среде может применяться метод анализа траекторий наночастиц, основанный на рассеянии света. Метод позволяет анализировать образцы с высокой точностью и не требует сложной подготовки проб. За счёт отслеживания траектории движения каждой отдельной частицы, попадающей в поле зрения камеры, программное обеспечение позволяет рассчитать гидродинамический диаметр частиц, а также оценить концентрацию частиц в образце [3].

II. Результаты

Была разработана экспериментальная установка для реализации метода анализа траекторий наночастиц, включающая полупроводниковый лазер с длиной волны 638 нм, оптический модуль, формирующий плоский лазерный пучок для облучения образца наночастиц, систему фокусировки, высокочувствительную КМОП камеру, управляющий компьютер (рис.1).

Анализ микрочастиц пластика проводился при помощи флуоресцентной микроскопии. Окрашенные образцы имеющие крупные фракции частиц (более 1 мкм) центрифугировались при 15,000g и осадок измерялся на микроскопе. Надосадочная жидкость измерялась при помощи разработанной установки.

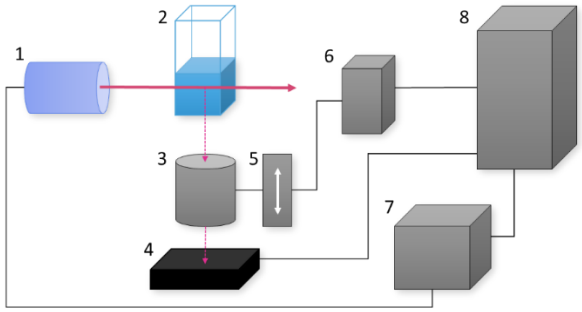


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования дисперсий наночастиц:
1- оптический модуль, 2 -кювета с образцом, 3 - объектив, 4 -камера,
5 - устройство для перемещения объектива, 6- контроллер перемещения объектива,
7 - блок управления лазером, 8 - управляющий компьютер

Особенностью установки является возможность детектирования частиц с флуоресцентными метками, что значительно повышает селективность анализа в сложных матрицах. Перед камерой был установлен светофильтр для получения сигнала от частиц с флуоресцентными метками. Для идентификации образца требуется получение видеозаписи продолжительностью 20-60 секунд, за счёт чего методика является высокопроизводительной и позволяет анализировать до 20 проб в час.

С использованием разработанной установки были проведены измерения образцов жидких дисперсий полистирольных частиц известных размеров (15-1000 нм), помеченных флуоресцентным красителем Cyanine 5 (Cy5), с максимумом испускания на длине волны 662 нм. Для регистрации сигналов от полимерных наночастиц сначала получались изображения с выдержкой порядка 1 секунды для обнаружения светящихся частиц. После этого включалась подсветка и записывалась видеозапись броуновского движения частиц в режиме регистрации рассеянного света. В процессе обработки полученных видеофайлов для последующего анализа были вырезаны области, содержащие исследуемые структуры, для уменьшения влияния посторонних фрагментов на результаты измерения.

Обработка результатов выполнялась при помощи плагина NanoTrackJ программы для обработки и нализа изображений ImageJ. Проведенные ранее исследования показали достоверность результатов, получаемых при помощи данной программы в сравнении с коммерческими аналогами [4].

Результаты определения размеров полистирольных частиц показали хорошее соответствие с паспортными данными с отклонением не более 13 % для частиц от 50 нм (рис. 2).

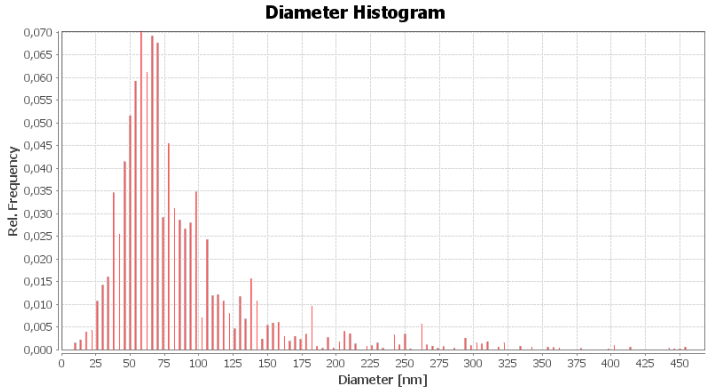


Рис.2. Пример результата расчета размеров эталонных наночастиц диаметром 50 нм при помощи плагина NanoTrackJ

Таким образом, была разработана экспериментальная установка и комплексная методика анализа образцов микро- и наночастиц пластика в водной среде, включающая пробоподготовку, протокол измерений, распределения частиц по размерам, расчет концентрации.

III. Заключение

Была показана возможность применения метода анализа траекторий наночастиц для определения размеров и концентрации флуоресцентных микро- и наночастиц в жидкой дисперсии. Высокая чувствительность и быстрота получаемых результатов без необходимости проведения сложной пробоподготовки позволяют применять методику при исследовании проб воды. Предложенный подход открывает новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований в области экологического мониторинга и оценки рисков, связанных с микро- и нанопластиком.

Литература

[1] Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R. H. “The plastic brain: neurotoxicity of micro-and nanoplastics”, *Particle and fibre toxicology*, *17*, 2020, 1-16.

[2] *Tamminga M. Hengstmann E., Fischer E. K.* “Nile Red Staining as a Subsidiary Method for Microplastic Quantification: A Comparison of Three Solvents and Factors Influencing Application Reliability”, *SDRP Journal of Earth Sciences & Environmental Studies*, 2(2), 2017, pp. 165-172.

[3] *Maguire C. M., Sillence K., Roesslein M*. “Benchmark of Nanoparticle Tracking Analysis on Measuring Nanoparticle Sizing and Concentration”, *Journal of Micro- and Nano-Manufacturing*, 5, 2017, pp. 041002 1-10.

[4] *Monakhova P. A., Shalaev P. V., Bondina E. V*. “A Comparative Study of Different Software Packages for Nanoparticle Tracking Analysis”, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 2832-2835.

Алгоритм автоматической разметки тета-ритмов с использованием вейвлет-преобразования Морле

А. А. Грищенко[1,2], А. С. Джафарова[1,2], А. Ю. Долинина[1,2], Е. М. Сулейманова[3], И. В. Сысоев[1,2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,

[2]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Чернышевского, г. Саратов, Россия,

[3]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва, Россия,

vili_von@mail.ru

Аннотация. *Во время сна могут выявляться различные патологии, поэтому важно знать как выглядит норма. В данной работе мы рассматриваем тета-ритмы в мозге здоровых крыс во время сна. В работе разработан автоматизированный алгоритм для обнаружения тета-ритма, основанный на вейвлет-преобразовании Морле. Он позволяет выделять значимую ритмическую активность и исключать случайные колебания или шумы. Использование вейвлет-преобразования Морле обеспечивает хорошую локализацию по времени и частоте, что важно для анализа динамики мозговых ритмов и их роли в когнитивных процессах. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию механизмов генерации тета-ритма и его функционального значения в мозге животных, а также могут быть использованы для диагностики нарушений или изучения механизмов взаимодействия различных структур мозга во время сна и бодрствования.*

I. Введение

Сон — это важная составляющая процесса жизнедеятельности человека и животных. В состоянии сна болезни и патологии не только выявляются более отчетливо, некоторые отклонения можно обнаружить только в состоянии сна. Поэтому исследования здорового сна очень важны: чтобы выявить нарушения. нужно определить норму. Во сне мозг работает и, следовательно, сон можно изучать по сигналам мозга — поверхностным и внутричерепным (у лабораторных животных) энцефалограммам. Традиционно принято разделять сон на различные фазы, основываясь на степени синхронизации ЭЭГ и частотном составе. Так же как и для человека, для крыс выделяют следующие основные диапазоны ЭЭГ [1]: 1. Альфа-диапазон (10–15 Гц); 2. Бета-диапазон (15–50 Гц); 3. Дельта-диапазон (1–4 Гц); 4. Тета-диапазон (4–8 Гц); 5. Гамма-диапазон (60 – 170 Гц).

В данной работе мы сосредоточимся только на тета-волнах, которые в основном возникают в гиппокампе и фронтальной коре [2, 3].

Тета-ритм в гиппокампе крыс является одним из наиболее подробно изученных мозговых ритмов. Исследования показывают, что тета-ритм гиппокампа у грызунов тесно связан с их поведением: состояния покоя и автоматизированные движения соответствуют нерегулярной активности гиппокампа, а небольшие движения сопровождаются ритмичной тета-активностью с меньшей амплитудой и пониженной средней частотой [3]. Считается, что тета-ритм может играть важную роль в когнитивных процессах и взаимодействиях между корой головного мозга и гиппокампом [4].

II. Материалы и методы

Данные представляют собой записи локальных потенциалов мозга у крыс линии Вистар, полученные в Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии города Москвы [5]. В данной работе исследуются 15 самцов-крыс, которые содержались в стандартных лабораторных условиях с доступом к пище и воде, при соблюдении светового режима 12 часов. Все животные не

имели патологических отклонений. Локальные потенциалы у свободно движущихся животных регистрировались с левой и правой лобной коры (FC) и гиппокампа (Hip). Записи каждого животного проводилась в течение двух суток. Сигналы оцифровывались с постоянной частотой дискретизации 258 Гц.

Ранее мы разработали алгоритм для автоматического обнаружения эпилептических разрядов [6], в данной работе он был модернизирован для автоматического обнаружения тета-ритма в сигнале локальных потенциалов мозга. Алгоритм основан на вейвлет-преобразовании и анализе мощности в определённых частотных диапазонах. Идея алгоритма состоит в следующем.

Сначала нужно определить диапазон частот. Определим фоновые частоты: задаётся диапазон, в котором предполагается наличие общего фонового сигнала, например, от 1 до 12 Гц. Этот диапазон охватывает основные ритмы мозга и позволяет учитывать вариации в спектре. Затем определяем диапазон тета-ритма: выделяется диапазон 4–8 Гц, так как именно в этом диапазоне обычно регистрируется тета-активность. Для анализа сигнала выполняется вейвлет-преобразование Морле (Morlet wavelet), которое хорошо локализовано по частоте и времени, что важно для выявления осцилляций мозга. Вейвлет-преобразование проводится для частотного диапазона от 1 до 12 Гц с некоторым шагом (например, 0.5 Гц). Это позволяет получить спектр мощности по каждой частоте и во времени. После преобразования вычисляется мощность сигнала на каждой частоте и во времени. Для определения наличия тета-ритма усредняют мощность по всему тета-диапазону (4–8 Гц) и по всему времени записи, получая среднюю мощность в этом диапазоне. Аналогично рассчитывается средняя мощность фона — по всему диапазону 1–12 Гц. Если средняя мощность в тета-диапазоне превышает среднюю мощность фона более чем в заданный коэффициент (в 1.5 раза), то делается вывод о наличии тета-ритма в данном участке сигнала. Такой подход помогает исключить случайные колебания и определить значимую ритмическую активность.

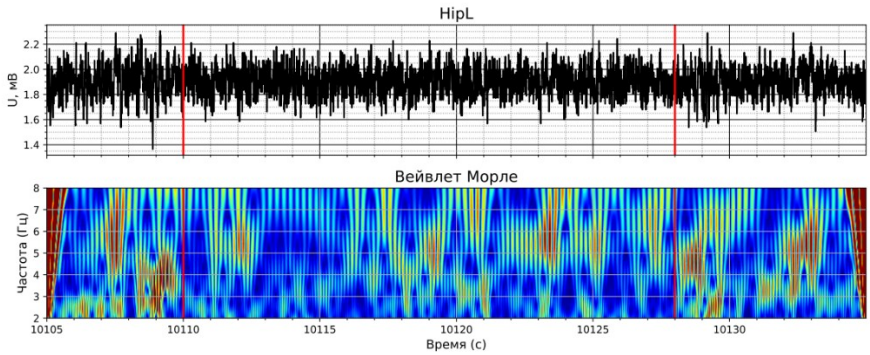


Рис.1 Сигнал ЭЭГ с найденным с помощью алгоритма тета-ритмом
и спектрограмма вейвлет преобразования

На рисунке 1 представлен пример тета-ритма и спектрограмма вейвлет преобразования. Красные линии обозначают начало тета-ритма.

III. Заключение

Вейвлет-преобразование Морле обеспечивает хорошую локализацию по частоте и времени, что важно для анализа динамики мозговых ритмов и отличия настоящих осцилляций от шума или случайных колебаний. Этот метод позволяет автоматически выявлять присутствие тета-ритмов в сложных нейрофизиологических данных, что важно для последующего анализа состояния мозга или поведения животных.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00176.

Литература

[1] *Léger D, Debellemaniere E, Rabat A, Bayon V, Benchenane K, Chennaoui M* // Sleep Medicine Reviews — 2018. — V.41 — P.113-132, DOI: 10.1016/j.smrv.2018.01.008

[2] *Виноградова О.С.* Гиппокамп и память. — М.: Наука, 1975. — С. 136-171. — 332 с.

[3] *Young C. K., McNaughton N.* Coupling of theta oscillations between anterior and posterior midline cortex and with the hippocampus in freely behaving rats // Cerebral Cortex. – 2009. – Т. 19. – № 1. – С. 24-40, DOI: 10.1093/cercor/bhn055.

[4] *Nuñez A., Buño W.* The theta rhythm of the hippocampus: from neuronal and circuit mechanisms to behavior // Frontiers in cellular neuroscience. – 2021. – Т. 15. – С. 649262, DOI: 10.3389/fncel.2021.649262

[5] *Suleymanova E., Shangaraeva V., van Rijn C.M., Vinogradova L.*"The cannabinoid receptor agonist WIN55.212 reduces consequences of status epilepticus in rats", Neuroscience, Volume 334, pp. 191–200

[6] *Ершова А.С., Сулейманова Е.М., Грищенко А.А., Виноградова Л.В., Сысоев И.В.* "Межполушарная симметрия и асимметрия пик-волновых разрядов абсансного типа, вызванных системным введением пентилентетразола", Российский физиологический журнал им.Сеченова, 109(2), 2023, с. 241–251.

Импульсно-вихретоковый преобразователь для контроля внутренней поверхности промысловых трубопроводов

Е. А. Славинская, В. П. Лунин, А. К. Шепелев
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
slavinskyaya@mpei.ru, luninvp@mpei.ru, shepelevak@mpei.ru

Аннотация. *Диагностика промысловых трубопроводов является важным инструментом по обеспечению безопасной транспортировки углеводородов. Работа посвящена исследованию свойств импульсного вихретокового преобразователя, предназначенного для обнаружения внутренних повреждений и остаточной толщины ферромагнитных труб с изоляционным покрытием. Построена конечно-элементная модель преобразователя с концентратором магнитного потока в виде тороидального сердечника, на базе которой выполнены оценочные расчеты сигналов при различных параметрах повреждений. Выбраны диагностические признаки сигнала, для которых построены поверхностные диаграммы относительно плоскости с размерной сеткой повреждения. На основе полученного массива данных разработана методика оценки остаточной толщины трубы и размеров локального коррозионного поражения. Результаты исследования могут получить применение при разработке систем мониторинга промысловых трубопроводов.*

I. Введение

Неотъемлемой частью системы сбора и транспорта продукции нефтяных и газовых станций являются промысловые трубопроводы, предназначенные для транспортирования природного газа, нефтепродуктов, воды и их смесей на месторождениях. Надежность работы и срок службы промысловых трубопроводов во многом определяются степенью их защиты от воздействия агрессивной среды. Распространены промысловые трубопроводы с внутренним антикоррозионным покрытием на основе эпоксидных и полимерных смол. В области нарушения внутреннего покрытия под воздействием жесткой среды формируются локальные повреждения, которые часто становятся причиной аварийных ситуаций [1]. Применяемые в настоящее время традиционные методы (ультразвуковой, электромагнитно-акустический и др.) неразрушающего контроля [2] требуют снятия защитного покрытия в зоне диагностики, что усложняет и удорожает процедуру. Этого ограничения не имеет импульсный вихретоковый метод контроля [3, 4]. Его отличие от традиционного гармонического подхода состоит в использовании коротких возбуждающих импульсов для генерации вихревых токов в объекте контроля (ОК). Короткие импульсы возбуждения имеют широкий частотный спектр, что обеспечивает значительную глубину проникновения вихревых токов во внутреннюю структуру ОК. По мере проникновения вихревых токов напряжение, регистрируемое на измерительной обмотке (ИО), накапливает информацию о каждом пройденном слое, что является важным свойством при контроле многослойных объектов.

На основе численной модели получены характеристики импульсного вихретокового преобразователя (ИВТП) при наличии локальных внутренних повреждений трубопровода. Результаты исследования дополнят существующие представления о вихретоковых переходных процессах в многослойных объектах с ферромагнитным основанием и потенциально лягут в основу калибровочных зависимостей, предназначенных для разработки систем технического мониторинга.

II. Постановка задачи

Конструкция ИВТП представляет собой систему индуктивных катушек с ферромагнитным сердечником в качестве концентратора магнитного поля. Форма и ориентация обмотки возбуждения (ОВ) способствует локализации вихревых токов в ОК [5]. Импульсное возбуждение осуществляется

путем подачи напряжения прямоугольной формы. Это индуцирует вихревые токи в объекте в момент изменения магнитного потока, создаваемого током ОВ. Затухание вихретокового процесса в первом приближении соответствует экспоненциальному закону, а его эквивалентная постоянная времени определяется по формуле:

$$\tau_{eq} = R^2 \mu \mu_0 \sigma, \quad (1)$$

где R – радиус ОВ, μ – относительная магнитная проницаемость ОК, μ_0 – магнитная постоянная, σ – электропроводность ОК.

Контроль толщины ОК можно проводить только в конце переходного процесса, когда вихревые токи достигнут противоположной границы ОК, а значит активное сопротивление их контура будет ограничено толщиной.

Для решения поставленной задачи создана трехмерная конечно-элементная модель (рисунок 1). Объектом исследования выступает пластина из ферромагнитной стали (μ = 100, σ = 1,2 МСм/м) толщиной 10 мм как имитация трубы достаточно большого диаметра. ИВТП состоит из ОВ с ферритовым сердечником (μ = 1000) и 2-х обмоток для измерения. Внутренний дефект в виде цилиндрического выреза имеет варьируемый диаметр D и высоту H. Зазор между ИВТП и пластиной составляет 6 мм в соответствии со стандартной толщиной изоляции.

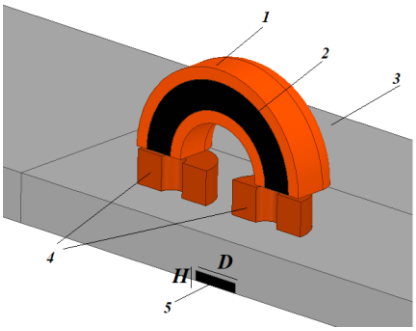


Рис.1. Геометрическая модель ИВТП над ОК:
1 – ОВ, 2 – сердечник, 3 – ОК, 4 – ИО, 5 - дефект

III. Результаты моделирования

В рамках моделирования получены временные зависимости разностного напряжения ИВТП, зарегистрированного на бездефектном и дефектном образце. Размеры дефекта изменялись для исследования свойств предложенной конструкции преобразователя и определения чувствительности к локальным повреждениям.

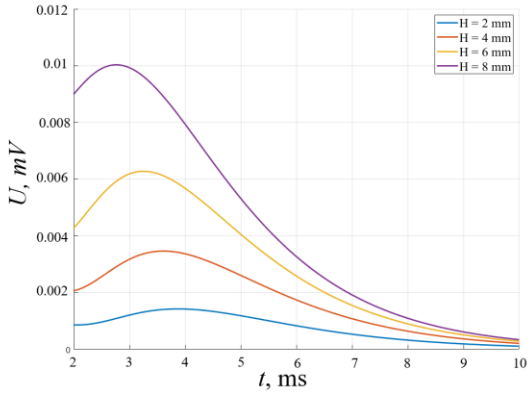


Рис.2. Временные зависимости вносимого напряжения
при разном значении высоты дефекта H

Семейство разностных сигналов вносимого напряжения для дефекта диаметром $D = 10$ мм при вариации высоты дефекта H в диапазоне от 2 до 8 мм представлены на рисунке 2. Диагностическими признаками могут выступать максимум разностного напряжения U_m и время прихода максимума t_m, Максимальное значение напряжения преимущественно отражает диаметр дефекта – чем больше значение максимума, тем шире поражение. Время прихода максимума может в значительной мере свидетельствовать о глубине дефекта – чем раньше регистрируется максимум напряжения, тем ближе к поверхности залегает дефект, а значит тоньше остаточный слой металла трубы.

Для каждого диагностического признака построены поверхностные диаграммы, отражающие распределение его значения в зависимости от различных комбинаций размеров дефекта – диаметра D и высоты H.

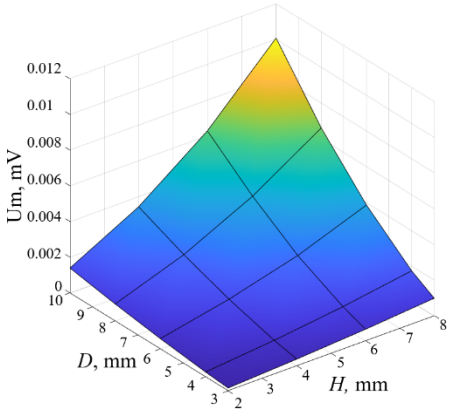


Рис.3. Поверхностная диаграмма распределения максимума разностного напряжения U_m

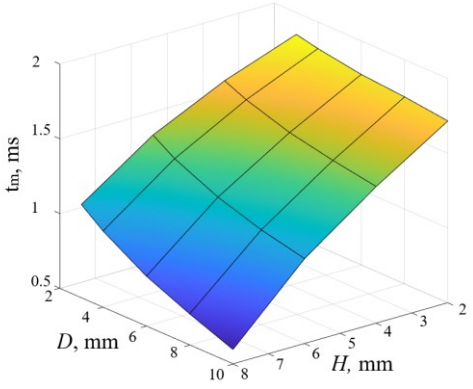


Рис.4. Поверхностная диаграмма распределения времени прихода максимума разностного напряжения t_m

IV. Заключение

В работе проведено исследование возможностей импульсно-вихретокового метода контроля внутренней коррозии в ферромагнитных трубах с изоляционным защитным покрытием. По результатам конечно-элементного моделирования сигналов ИВТП с ферритовым тороидальным сердечником получены калибровочные зависимости. Эти зависимости представлены в виде поверхностных диаграмм распределения диагностических параметров от сочетаний размеров локального дефекта. Дальнейший этап работы предполагает сбор базы диагностических данных с более тонкой вариацией параметров повреждения. Расширенный объем информации позволит создать надежную модель множественной регрессии для прогнозирования и оценки параметров выявляемого дефекта. После разработки макета ИВТП и изготовления образцов планируются испытания в лабораторных условиях, а затем и натурные эксперименты на реальных объектах.

Литература

[1] *Q. Cao, T. Pojtanabunotoeng, M. Esmally.* “A review of corrosion under insulation: a critical issue in the oil and gas industry”, *Metals* 12(4), 2022, 561.

[2] *Yung, T. C., Pang, J. S., Hamid, M. A., Ooi, L. E., & Tan, W. H.*, “Ultrasonic guided wave testing on pipeline corrosion detection using torsional T (0, 1) guided waves”. *J. Mech. Eng. Sci*, 2022, pp. 9157–9166.

[3] *A. Sophian, G. Tian, and M. Fan.* “Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review”, *Chin. J. Mech. Eng.*, 30(3), 2017, pp. 500–514.

[4] *Burke, S.K., Hugo, G.R., Harrison, D.J.* “Transient eddy-current NDE for hidden corrosion in multilayer structure”, *Rev. Progr. Quant. Nondestruct. Eval.* 17, 1998, pp. 307–314.

[5] *Fu Y., Underhill P. R., Krause T. W.* “Factors affecting spatial resolution in pulsed eddy current inspection of pipe”, *J. Nondestruct. Eval*, 39, 2020, pp. 1–9.

Проектирование прибора для оценки уровня коррозии арматуры в железобетонных конструкциях

И. М. Боготов, В. П. Лунин
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
BogotovIM@mpei.ru, LuninVP@mpei.ru

Аннотация. *В статье представлены результаты проектирования прибора для контроля коррозионного состояния стальной арматуры в железобетонных конструкциях на основе вихретокового метода. Для проведения исследований была построена конечно-элементная модель многовитковой катушки, включённой в колебательный RLC-контур, работающий в резонансном режиме. Основное внимание уделяется анализу эффективного сопротивления R_{eff} и эффективной индуктивности L_{eff} системы, демонстрирующих устойчивую зависимость от степени коррозионного повреждения. Полученные результаты демонстрируют чувствительность разработанной схемы к изменениям параметров состояния арматуры, позволяя не только обнаруживать наличие коррозии, но и количественно оценивать степень повреждения. Это открывает перспективы для эффективного мониторинга состояния железобетонных конструкций без разрушения защитного бетонного слоя.*

I. Введение

Железобетонные конструкции, широко используемые в строительстве мостов, зданий и других объектов, подвержены коррозии стальной арматуры, что может привести к снижению их несущей способности и безопасности. Своевременный и точный контроль состояния арматуры является важной задачей для обеспечения долговечности конструкций [1].

Среди методов неразрушающего контроля вихретоковый метод привлекает внимание благодаря своей высокой чувствительности к изменениям свойств контролируемого металла, способности диагностировать изделия через диэлектрические покрытия и возможности локализации дефектов [2].

В статье отображен этап трехмерного конечно-элементного моделирования вихретоковой катушки с учетом подключения ее к электрической схеме колебательного контура проектируемого прибора, предназначенного для оценки уровня коррозии арматуры в железобетонных конструкциях на основе анализа четырёх ключевых параметров вихретокового зондирования [3].

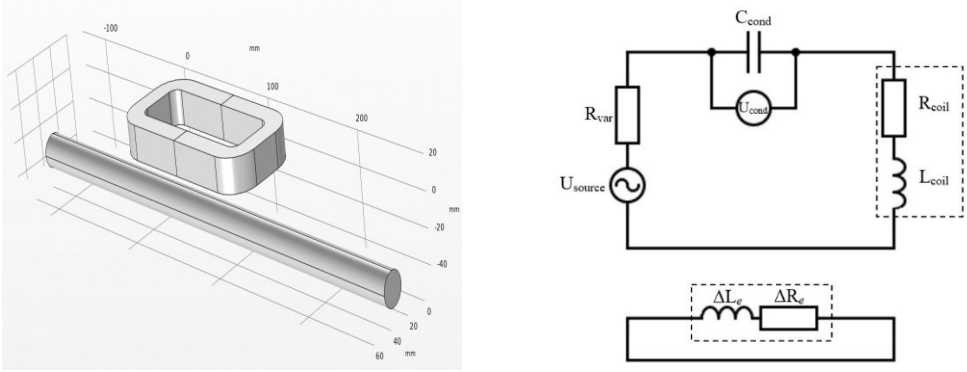
II. Построение модели и разработка электрической схемы

Для проектирования прибора была построена конечно-элементная модель многовитковой катушки, включённой в колебательный RLC-контур, состоящий из катушки, конденсатора и резистора (рис. 1). Электрическая схема рассчитана на работу в резонансном режиме, что обеспечивает высокую чувствительность и информативность измерений. Эффективные параметры системы при наличии арматуры определяются по формулам:

$$L_{eff} = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 C_{cond}} \quad (1)$$

$$R_{eff} = \frac{\underline{U}_{source}}{2\pi f_n C_{cond} \underline{U}_{cond}} \quad (2)$$

где f_n - резонансная частота при сканировании арматуры, U_{cond} - напряжение на конденсаторе, C_{cond} - ёмкость конденсатора в схеме.



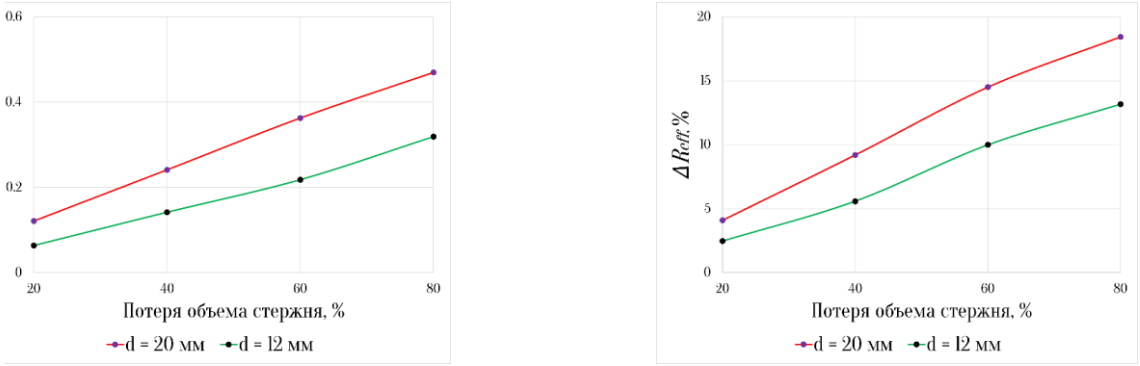
а) б)

Рис. 1. Модель многовитковой катушки вихретокового преобразователя и ферромагнитного стержня (а) и электрическая схема колебательного RLC-контура (б)

III. Анализ результатов

В результате расчетов была получена зависимость эффективных параметров вихретокового сигнала от степени коррозионного повреждения арматуры. Анализ показал, что как величина L_{eff}, так и параметр R_{eff} демонстрируют устойчивый рост отклонений от номинальных значений по мере развития коррозионного процесса. Наблюдаемые отклонения имеют важное практическое значение, поскольку позволяют количественно оценивать степень коррозионного повреждения: изменение эффективной индуктивности отражает локальные потери металла, а рост эффективного сопротивления свидетельствует о развитии протяженных дефектов.

Для обоих параметров наблюдаются схожие закономерности: наибольшие отклонения фиксируются при значительных степенях повреждения, причем протяженные дефекты вызывают более выраженные изменения. Особенно заметный рост отклонений отмечается при повреждениях, охватывающих более половины сечения арматурного стержня.



а) б)

Рисунок 6 - Влияние объема корродированного металла на параметры вихретокового сигнала: (а) эффективная индуктивность L_{eff}; (б) эффективное сопротивление R_{eff}

Для комплексной оценки коррозионных повреждений разработан метод визуализации дефектов, позволяющий определять их локализацию и геометрические параметры (Рис. 3). Полученные зависимости показывают, что совместный анализ изменений L_{eff} и R_{eff} с визуализацией повреждений позволяет эффективно оценивать состояние арматуры.

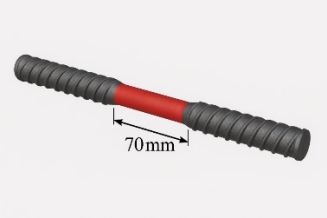


Рис 3. Визуализация дефектного участка арматуры:
протяжённость 70 мм, утонение 80 %

IV. Заключение

В результате работы была разработана и исследована конечно-элементная модель многовитковой катушки, включенной в электрическую схему колебательного RLC-контура прибора, предназначенного для неразрушающего вихретокового контроля коррозионного состояния арматуры в железобетонных конструкциях. Предложенная схема предполагает работу в резонансном режиме, повышая при этом чувствительность прибора и точность измерения информативных параметров. Анализ полученных результатов показал возможность эффективного использования разрабатываемого подхода для выявления и количественной оценки уровня коррозии без нарушения бетонного покрытия, что подтверждает перспективность дальнейшего развития данного направления исследований.

Литература

[1] *Frankowski, P.K., Majzner, P., Mąka, M., & Stawicki, T.* (2024). Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures with Magnetic Flux Leakage and Eddy Current Methods—Comparative Analysis. *Applied Sciences*, 14(24), 11965. https://doi.org/10.3390/app142411965

[2] *He, D.* (2024). Detecting the Corrosion of a Steel Rebar Using the Eddy Current Testing Method. Standards, 4(4), 286-299. *https://doi.org/10.3390/standards4040014*

[3] *И.М. Боготов, В.П. Лунин*, Выявление Дефектов Арматуры Вихретоковым Методом *Тезисы докладов XXXI Международ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов.* — М.: МЭИ, 2025. с. 300

Исследование характеристик трёхкаскадного микроструйного генератора планарной конструкции с характеристическим размером 100 мкм

М. П. Калибабчук
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия
mryazanova1@mail.ru

Аннотация. *В работе построена компьютерная модель трехкаскадного микроструйного генератора планарной конструкции с характеристическим размером 100 мкм. Проведено компьютерное моделирование рабочего процесса в трёхкаскадном микроструйном генераторе планарной конструкции с шириной канала питания 100 мкм с целью определения его номинальных и предельных функциональных характеристик. Установлена зависимость скорости в канале питания от перепада давления, определена нижняя граница начала возникновения колебательного процесса рабочего вещества. Получены распределения скоростей и давлений рабочего вещества внутри рассматриваемой конструкции. Результаты могут быть использованы при проектировании высоконадёжных струйных систем управления для авиационной и космической техники, работающих в условиях экстремальных воздействий, включая электромагнитные поля большой мощности и высокие уровни радиации и температур.*

I. Введение

Элементы и устройства дискретной микрофлюидики используются для построения высокоточных измерительных систем и систем управления критическими объектами, работающими в условиях электромагнитных полей большой мощности, высоких уровней радиации и температур [1, 2]. Для разработки высоконадежных резервных струйных систем управления требуется иметь данные о параметрах отдельных струйных элементов, особенно тех, которые составляют основу построения цифровых струйных схем. Примерами отдельных струйных элементов являются триггеры, реле, одно- и многокаскадные генераторы. При их разработке ключевое значение имеют параметры рабочего режима – рабочие диапазоны давлений, скоростей, а также границы начала и конца генерации импульсов.

II. Описание модели

Одним из наиболее распространенных элементов микрофлюидики, используемых в системах управления, является микроструйный генератор. Трёхкаскадный микроструйный генератор состоит из трёх последовательно соединённых триггеров, каждый из которых имеет два устойчивых состояния и работает в режиме логического переключения («0»/»1») при помощи сигналов обратной связи. Принцип действия микроструйного триггера основан на эффекте Коанда (прилипания струи к близко расположенной поверхности, стенки рабочего профиля) и явлении взаимодействия струй. Управление переключением логических состояний триггера осуществляется при помощи сигналов обратной связи, передаваемых от выходных каналов триггера к каналам управления, выполненных почти перпендикулярно каналу питания. Конструкция генератора состоит из трёх каналов питания и рабочих камер, шести каналов обратной связи и атмосферных каналов. На рисунке 1 представлен трёхкаскадный микроструйный генератор.

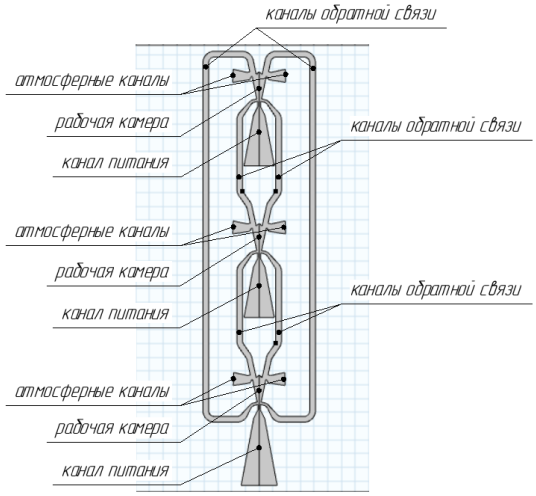


Рис.1. Трёхкаскадный микроструйный генератор

Принцип работы генераторов основан на последовательном преобразовании нестабильного потока жидкости или газа в идеально управляемую микрострую. Использование трёх каскадов вместо одного или двух позволяет получить высокое усиление сигнала, достигнуть низкой чувствительности к внешним возмущениям, стабилизировать параметры струи, сохранить простоту конструкции. Двухкаскадные конструкции, хотя и проще в производстве, не обеспечивают стабильности параметров на уровне трёхкаскадного генератора. Добавление четвёртого каскада, по экспериментальным данным, даёт лишь незначительное улучшение характеристик при существенном увеличении гидродинамического сопротивления.

Основная функция трёхкаскадного микроструйного генератора — преобразование входного управляющего сигнала (давления или направления струи) в выходной сигнал заданной интенсивности и направления, а также генерации сигналов определённой частоты.

Исходные данные для моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Рабочее вещество	
Воздух	
Граничные условия	
Давление питания, Па	var
Давление на выходе атмосферных каналов, Па	0

III. Результаты моделирования

Результаты моделирования рабочего вещества для данной конструкции представлены на рисунке 2 в виде графика, показывающего зависимость скорости в канале питания от перепада давления. С увеличением перепада давления скорость растёт нелинейно, постепенно приближаясь к своему предельному значению.

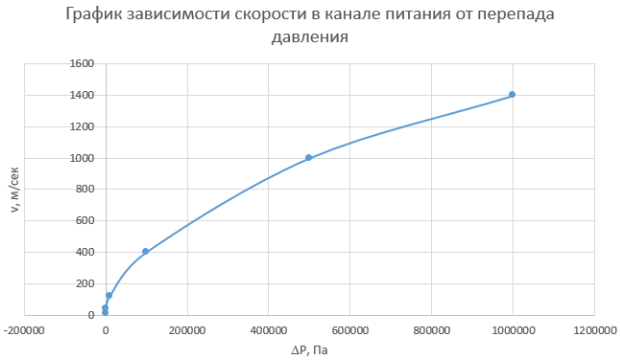


Рис.2. График зависимости скорости в канале питания от перепада давления

Распределение скоростей и давлений в конструкции представлены на рисунке 3.

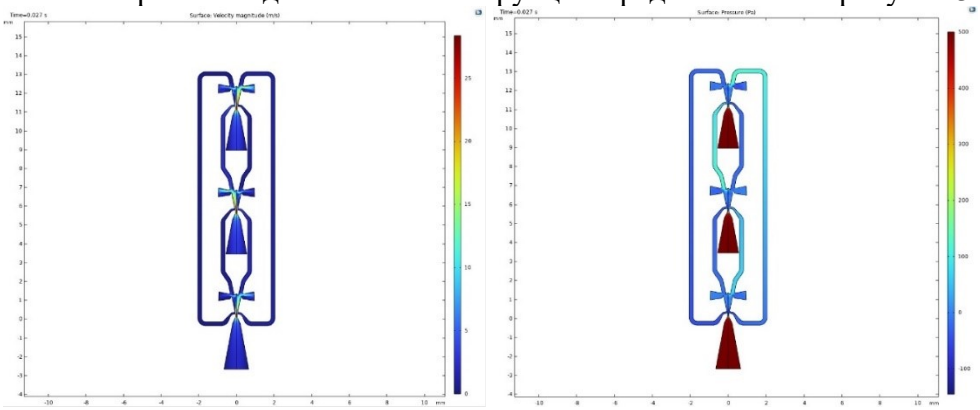


Рис.3. Распределение скорости и давления в трёхкаскадном микроструйном генераторе

При компьютерном моделировании рабочего процесса была определена нижняя граница возникновения колебательного процесса. Она составляет 500 Па.

IV. Заключение

В результате проведенных исследований построена компьютерная модель трехкаскадного микроструйного генератора планарной конструкции с характеристическим размером 100 мкм. При помощи созданной компьютерной модели проведен вычислительный эксперимент по определению номинальных и предельных функциональных характеристик генератора. Установлена зависимость скорости в канале питания от перепада давления, определена нижняя граница начала возникновения колебательного процесса для данной конструкции.

Литература

[1] *Kasimov A. M., Mamedli E. M., and Mel'nikov L. I.* “Issues of Design and Production of Heterogeneous Control System of Aircrafts” // *Sensors & Systems*. 2012. No 5. P. 2-6.

[2] *Ivchin V. A., Samsonov K. Y., Kasimov A. M., and Popov A. I.* “Development of the technical solution to prevent a single-rotor helicopter from entering uncontrolled rotation” // *Scientific Bulletin of MSTU CA.* M.: Nias, 2022. Vol. 25, No 03. P. 51-60.

Управление балансом массообмена при автоматизированном перитонеальном диализе

Н. М. Жило, К. В. Пожар
Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, г. Москва, Россия,
nikitazhilo@gmail.com

***Аннотация**. Управление балансом массообмена является одной из важных задач в области построения технических систем для перитонеального диализа (ПД). Эффективность процедуры ПД обеспечивается поддержанием баланса массообмена путём управления процессами введения чистого и удаления отработанного растворов, а также управления составом вводимого раствора, что в свою очередь влияет на интенсивность диффузионного и осмотического массопереноса. Управление балансом массообмена позволяет персонализировать процедуру ПД, повысить её безопасность, а также снизить потребление расходных материалов. На практике для проведения ПД широко применяются технические средства введения и удаления раствора, называемые системами автоматизированного перитонеального диализа (АПД). Такие системы позволяют осуществлять удаление продуктов метаболизма, но в то же время не обеспечивают продолжительное удаление жидкости в связи со снижением интенсивности осмотического массопереноса, вызванным всасыванием глюкозы. Таким образом, для регулирования потока жидкости необходимо внешнее управление концентрацией осмотически активного вещества.*
В настоящей работе описывается разработанная система управления балансом массообмена при АПД, представляющая собой замкнутую систему управления концентрацией осмотически активного вещества, основанную на автоматическом регулировании скорости введения глюкозы по данным обратной связи от датчика глюкозы в комбинации с прогнозирующей моделью массообмена. Представлены принципы функционирования, состав и характеристики системы управления, а также методика и результаты испытаний аппарата ПД. Предложенная система АПД позволяет активно управлять скоростью удаления из пациента, снизить потребление раствора для ПД с 8-12 л до не более 2 л в сутки, при этом не снижая эффективности удаления из крови накопленных веществ и жидкости.

I. Введение

Одним из методов искусственного управления балансом массообмена является перитонеальный диализ, в котором раствор для перитонеального диализа объёмом до 3 литров подаётся в брюшную полость пациента, выполняющую роль массообменного пространства. За время процедуры (3-6 ч) раствор насыщается метаболитами, а за счёт осмотического агента в его составе происходит удаление излишков жидкости из общего объёма организма. Анализ текущих мировых разработок в области построения аппаратов АПД показал, что они могут увеличить продолжительность процедуры очищения крови от метаболитов до 7-16 ч от одного комплекта расходных материалов. При этом вопросу продолжительного управляемого удаления излишков жидкости внимания практически не уделяется: в части разработок вопрос не решён, в другой части применяется только слив излишков жидкости, и только в одном прототипе применено релейное управление введением осмотического агента без расчёта скорости удаления жидкости. Это может приводить либо к недостаточной скорости удаления жидкости, либо к избыточной, сопровождающейся раздражением и воспалением брюшной полости, а также повышением уровня глюкозы в крови до небезопасных уровней [1].

Таким образом, перспективным направлением исследований и разработок является создание автоматической системы с обратной связью, позволяющей управлять концентрацией осмотического агента в диализирующем растворе, что, в свою очередь, позволит управлять балансом массообмена

жидкости. Использование такой системы позволит создать аппарат для АПД со сверхнизким потреблением раствора для ПД. Кроме того, такая система позволит проводить процедуру искусственного очищения крови непрерывно.

Для полноценной реализации системы управления балансом массообмена необходимо учитывать физиологические характеристики пациента, основной из которых является проницаемость перитонеальной мембраны для осмотического агента. Помимо этого, для устойчивой работы системы необходимо с достаточной точностью оценивать скорость удаления жидкости и объём заполнения брюшной полости жидкостью, для чего требуется математическая модель, описывающая процессы массообмена в брюшной полости организма. Используя такую модель, можно разработать структуру и алгоритмы функционирования технической системы управления массообменом при АПД.

II. Материалы и методы

Процессы массообмена между кровью и диализирующим раствором можно представить как массоперенос веществ через полупроницаемую перитонеальную мембрану (рис. 1).

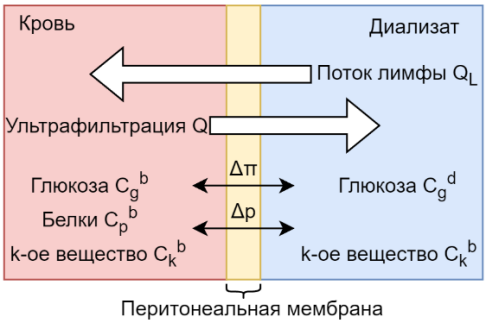


Рис.1. Массообмен через полупроницаемую перитонеальную мембрану

Используя уравнение Старлинга [2] для описания процессов переноса растворителя через полупроницаемую мембрану, можно получить уравнение потока веществ Q (1)

$$Q = KRT\left(\sigma_g\left(c_g^d - c_g^b\right) - \left(c_p^b - c_p^d\right) - \sum_k \sigma_k i_k\left(c_k^b - c_k^d\right)\right) \quad (1)$$

где K – гидравлическая проницаемость мембраны, R – газовая постоянная, T – температура раствора, σ – коэффициент отражения Ставермана, c – концентрация вещества, i – изотонический коэффициент раствора, $(\bullet)_b$ – индекс для показателей крови, $(\bullet)_d$ – индекс для показателей диализата, $(\bullet)_g$ – индекс для глюкозы, $(\bullet)_p$ – индекс для белков.

Используя ограничения, накладываемые условиями ПД, получаем систему уравнений (2), описывающих массообмен в брюшной полости

$$\begin{cases} \dfrac{dc_g^d(t)}{dt} = -c_g^d(t)\dfrac{\left(Q(t) - Q_L + k_g\right)}{V(t)} - \dfrac{Q(t)S - k_g}{V(t)}c_g^b - \left(\dfrac{k_g}{V(t)} - \dfrac{S\dfrac{Q(t)}{V(t)}}{e^{\frac{SQ(t)}{k_g}} - 1}\right)\left(c_g^b - c_g^d\right) \\ \dfrac{dV}{dt} = Q(t) - Q_L \end{cases} \quad (2)$$

где k – коэффициент массопереноса, S – коэффициент просеивания мембраны, V – объем жидкости, Q – поток удаляемой жидкости.

Полученная математическая модель позволяет описать структуру системы управления балансом массообмена при АПД (рис. 2). Получив данные от задающего устройства и датчиков обратной связи (датчика концентрации глюкозы и датчика давления жидкости), регулятор формирует управляющее воздействие для исполнительных устройств – дозатора глюкозы и перфузионной

системы, управляющей перемещением жидкости из брюшной полости через гидравлическую магистраль. Разработанный датчик концентрации глюкозы представляет собой бесконтактный проточный лазерный фотометрический измеритель поглощения излучения на длине волны 1600 нм, соответствующий пику поглощения глюкозы. Средняя относительная погрешность измерения составляет 12-15 % в диапазоне концентраций 42-220 ммоль/л [3].

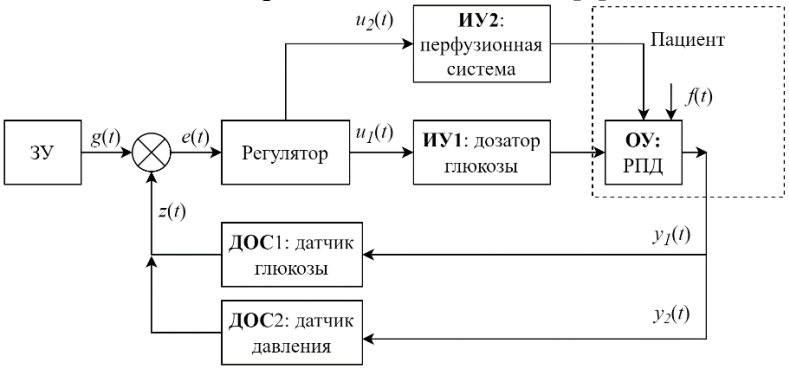


Рис.2. Система управления балансом массообмена для перитонеального диализа:
ЗУ – задающее устройство, ИУ – исполнительное устройство,
ОУ – объект управления (раствор для перитонеального диализа),
ДОС – датчик обратной связи, РПД – раствор для перитонеального диализа,
g(t) – целевая концентрация глюкозы в растворе, *z(t)* – сигнал ДОС,
e(t) – отклонение, uk(t) – управляющее воздействие,
$y_k(t)$ – управляемый параметр, *f(t)* – воздействие организма на ОУ

Разработанная система управления массообменом при АПД прошла комплекс испытаний для измерения характеристик (табл. 1) и проверки работоспособности.

Таблица 1. Характеристики разработанного аппарата

Характеристика	Значение
Диапазон скорости удаления жидкости	(1-5 мл/мин) ± 11 %
Диапазон расхода насоса диализ. раствора	(10…120 мл/мин) ± 10 %
Время непрерывной работы	не менее 24 ч.
Габаритные размеры и масса	210×130×95 мм, 855 г.
Расход диализирующего раствора	<2 л

III. Заключение

Проблема продолжительного управления балансом массообмена при АПД является важным направлением в области заместительной почечной терапии. В представленной работе предложена система управления, позволяющая активно управлять скоростью удаления жидкости из пациента, при этом уменьшая использование диализирующего раствора до 6 раз, не снижая при этом эффективность и безопасность процедуры.

Литература

[1] *Kay Tan, Boon, Cian Chan, and Simon J. Davies.* "Achieving euvolemia in peritoneal dialysis patients: a surprisingly difficult proposition". *Seminars in dialysis*. 23 (5), 2010, pp. 456-461.

[2] *Swapnasrita, Sangita*. "Computational modeling of peritoneal dialysis: An overview". *Mathematical Biosciences and Engineering* 22.2, 2025, pp.431-476.

[3] *Zhilo N.M., Mikhailov M.O., Litinskaia E.L., Pozhar K.V.* “IR-Photometry Method for Measuring Glucose Concentration in Peritoneal Dialysis Fluid”. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 24(4), 2021, pp. 68-78.

Автоматизированный подход к анализу паттернов при лимбической эпилепсии у крыс

А. С. Джафарова[1,2], А. А. Грищенко[1,2], Е. М. Сулейманова[3], М. В. Корнилов[1]

[1]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Чернышевского, г. Саратов, Россия,

[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,

[3]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва, Россия
dzhafarovaan@gmail.com

Аннотация. *В данной работе представлен автоматизированный подход к анализу эпилептических паттернов в записях локальных полевых потенциалов (LFP) крыс с пилокарпин-индуцированной лимбической эпилепсией. Цель исследования заключалась в разработке алгоритма, способного точно выявлять эпилептические паттерны разряда, используя временно-частотный анализ сигналов. Основным методом стало вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом «мексиканская шляпа», которое эффективно выделяет характерные паттерны эпилептической активности за счёт одновременного учёта временных и частотных характеристик сигнала. В рамках работы было проанализировано 72 записи LFP продолжительностью от 4 до 6 часов, полученные от 8 крыс линии Wistar из лобной доли коры больших полушарий и гиппокампа. Разработанный алгоритм продемонстрировал чувствительность на уровне 75–95% и специфичность 60 –70%, что подтверждает его надежность при детекции эпилептических разрядов. Особое внимание было уделено обработке нестационарных сигналов и устранению артефактов, что значительно повысило точность анализа в условиях экспериментальных данных.*

I. Введение

Лимбическая эпилепсия, связанная с патологической активностью височной доли мозга, представляет собой сложную диагностическую и исследовательскую задачу из-за вариабельности её проявлений. Традиционные методы анализа эпилептиформной активности зачастую требуют трудоёмкого визуального оценивания, что подчёркивает необходимость разработки автоматизированных подходов к обработке электроэнцефалографических данных [1]. В данном исследовании предложен алгоритмический подход к анализу паттернов пилокарпин-индуцированной эпилепсии у крыс, основанный на ключевых параметрах LFP-сигнала: амплитуде, частоте и временной динамике. В качестве модели использованы крысы линии Wistar с пилокарпин-индуцированной эпилепсией: проанализированы 72 многоканальные записи LFP общей продолжительностью 145 часов с частотой дискретизации 1000 Гц, полученные от 8 животных, в которых эпилептические приступы зарегистрированы лишь в трети случаев.

II. Формулы и рисунки

Для автоматического обнаружения эпилептических разрядов в нашем исследовании за основу был выбран метод вейвлет-преобразования с применением функции «мексиканская шляпа», который позволяет одновременно учитывать временные и частотные характеристики сигнала [2].

Однако перед применением вейвлет анализа, были выбраны участки с предположительной эпилептической активностью, на основе анализа амплитуды. Для каждой записи индивидуально подбиралось пороговое значение, равное удвоенной медиане сигнала, чтобы отделять фон от активности [3]. Перед анализом сигналы подвергались предварительной обработке, включающей в себя полосовую фильтрацию (0.5–100 Гц) для устранения низкочастотных дрейфов и высокочастотных шумов и нормировку амплитуд для минимизации межканальных различий. Затем для исключения артефактов применялся анализ квартилей, где в качестве границ использовались 5-

й и 95-й процентили, соответствующие нижнему и верхнему пределу допустимого диапазона амплитуд. Участки с амплитудами ниже 5-го или выше 95-го процентиля считались артефактами и не применялись для анализа.

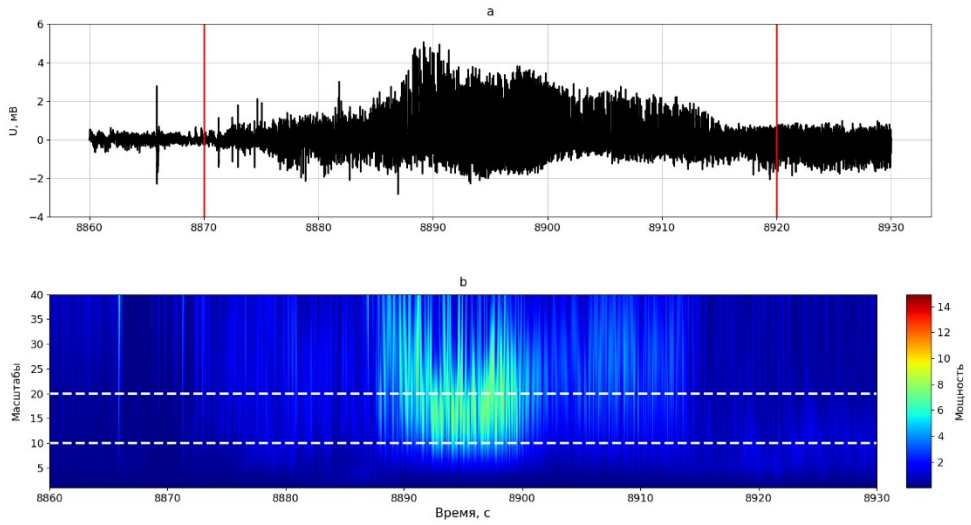


Рис.1. Временной ряд (a) и вейвлет скалограмма (b) сигнала *лобной* доли коры левого полушария крысы №1

На следующем этапе использовалось вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом "мексиканская шляпа", которое позволяет анализировать сигнал в разных частотных диапазонах. Исследовались масштабы 1–30, где лимбическая активность чаще всего проявлялась. Там искались всплески с высокой мощностью и регулярной структурой, характерные для эпилептиформной активности, что позволило определить локализацию разрядов. В результате работы алгоритма, программа автоматически выделяла начало и конец разряда, пример реализации представлен на рисунке 1, где красными полосами отмечены начало и конец разряда, который выбрал алгоритм основываясь на амплитудно-частотном анализе, а белые пунктирные линии на скалограмме (b) - основные масштабы, на которых для данного разряда большая мощность, которая расположена в пределах исследуемых масштабов.

III. Заключение

Разработанный алгоритм на основе вейвлет-анализа продемонстрировал достаточную эффективность в автоматическом выявлении эпилептических разрядов у крыс с пилокарпин-индуцированной эпилепсией. Метод показал хорошую чувствительность 75–95% и специфичность 60–70%, что делает его перспективным для использования в экспериментальных исследованиях. Полученные результаты подтверждают, что временной и частотный анализ с использованием вейвлетов позволяет повысить точность детекции эпилептиформной активности по сравнению с традиционными методами.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 25-22-00406.

Литература

[1] *A.A. Shandra, L.S. Godlevsky*, “Pentylenetetrazol-Induced Kindling as a Model of Absence and Convulsive forms of Epilepsy”, *Advances in Behavioral Biology*, 55, 2005, pp. 7-19.

[2] *А.А. Короновский*, “Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения”, *Физматлит*, 2003, с.6-9.

[3] А.*С. Ершова, Е.М. Сулейманова, А.А. Грищенко, Л.В. Виноградова, И.В. Сысоев*, “Межполушарная симметрия и асимметрия пик-волновых разрядов абсансного типа, вызванных системным введением пентилентетразола”, *Российский физиологический журнал им. Сеченова*, 109(2), 2023, с. 241-251.

Динамические изменения функциональной связности при развитии распространяющейся деполяризации в коре головного мозга

Д. А. Лачинова, М. П. Смирнова, И. В. Сысоев, Л. В. Виноградова
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва, Россия,
lachinova-dasha@yandex.ru

Аннотация. *Изучение нейросетевых механизмов головного мозга является актуальной исследовательской задачей, особенно динамическая модуляция функциональных связей между его областями. Под распространяющейся деполяризацией (РД) понимают волну интенсивной клеточной деполяризации, возникающую в ответ на острые повреждения мозга: инсульт, черепно-мозговую травму и состояние гипервозбудимости (судороги). Мы предположили, что развитие односторонней волны РД нарушает функциональные связи между разными областями коры головного мозга. Чтобы проверить эту гипотезу, используя ненаправленную меру – функцию взаимной информации, мы исследовали динамику межполушарных и внутриполушарных взаимодействий после фокального повреждения коры у крыс. Экспериментально показано, что развитие РД приводит к временному снижению связности между полушариями и повышению связанности в поврежденном полушарии. Таким образом, преходящая односторонняя дисфункция быстро активирует сетевые механизмы, что свидетельствует о замечательной функциональной гибкости сетей бодрствующего мозга.*

I. Введение

Распространяющаяся деполяризация (РД) – это волна интенсивной клеточной деполяризации, являющаяся важным компонентом острой реакции мозга на его повреждение [1]. Предполагается, что РД может участвовать в расширении области повреждения, развитии отставленных инсультов, когнитивных и психоэмоциональных нарушений. Поэтому сейчас РД признана важной мишенью мониторинга и терапии у пациентов с острым повреждением головного мозга.

Межполушарные взаимодействия играют ключевую роль в обеспечении когнитивных функций, соматосенсорной интеграции и поддержании сознания. Мы предположили, что развитие односторонней волны РД после повреждения мозга может нарушать функциональную связность и вносить вклад в патогенез заболеваний ЦНС. Для проверки этой гипотезы использовалась экспериментальная модель фокального повреждения коры крыс и исследовалась динамика функциональной связности после повреждения. Оценку связности проводили на основе анализа временных рядов, полученных при регистрации электрической активности коры.

Электрофизиологический эксперимент проводился на взрослых крысах-самцах линии Wistar в условиях свободного поведения. 900-секундные записи экспериментальных сигналов двух областей (соматосенсорной и ретросплениальной) коры обоих полушарий были получены до и после повреждения фронтальной коры левого и правого полушарий поочередно. Возникновение РД определялось по характерным медленным сдвигам внеклеточного потенциала.

Соматосенсорная область коры (s) тесно связана с обработкой сенсорной информации. Ретросплениальная кора (rs) вовлечена в процессы памяти и ориентации в пространстве. Предполагается, что функциональное взаимодействие этих областей коры играет важную роль в когнитивных процессах.

II. Формулы и рисунки

Записи делились на 20-секундные неперекрывающиеся последовательные интервалы. Для определения динамики связанности рассчитывалась нелинейная мера ненаправленного взаимодействия – функция взаимной информации, расчёт проводился методом ближайших соседей [2]:

$$MI = \psi(N) + \psi(k) - \langle \psi(n_X(i) + 1) + \psi(n_Y(i) + 1) \rangle_i, \quad (1)$$

где N – длина выборки, $n_X(i)$ и $n_Y(i)$ – число соседей i-й точки на плоскости (X, Y), $\psi(N)$ – дигамма-функция, k – номер соседа.

Отдельные результаты по каждому животному могут носить индивидуальный характер, поэтому было принято решение перейти к усреднению значений. На рис.1 представлены результаты усреднения значений функции взаимной информации для межполушарных связей в соматосенсорной (s) и ретросплениальной (rs) областях коры.

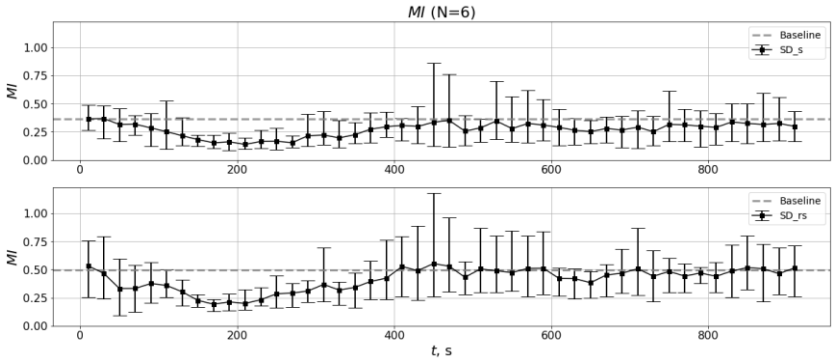


Рис.1. Усредненные по 6 записям значения функции взаимной информации (MI) с планками погрешностей в течение 900 с после фокального повреждения фронтальной коры для межполушарных связей. Пунктиром изображены усредненные значения, соответствующие фоновому уровню MI в отсутствие повреждения

Также проанализированы внутриполушарные связи между этими областями коры в каждом полушарии – поврежденном («aff.») и неповрежденном («nonaff.»).

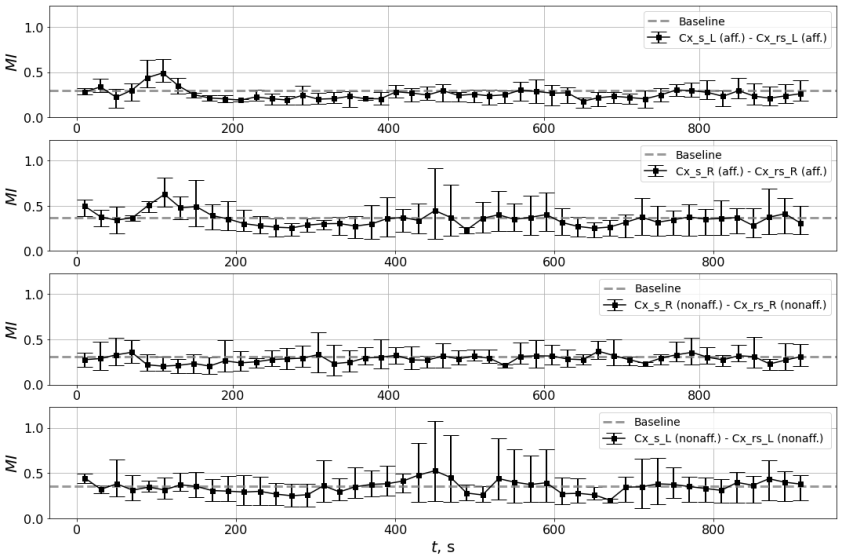


Рис.2. Усредненные по 6 записям значения функции взаимной информации (MI) с планками погрешностей в течение 900 с после фокального повреждения фронтальной коры для внутриполушарных связей. Пунктиром изображены усредненные значения, соответствующие фоновому уровню MI в отсутствие повреждения

III. Заключение

На основе статистической оценки полученной меры зафиксировано достоверное падение значений функции взаимной информации для межполушарных связей (рис.1) в течение трёх минут после прохождения волны РД как между полушариями соматосенсорной, так и ретросплениальной

коры. Для большинства животных нормальная связанность восстанавливалась через 350-400 с. Сходные результаты были получены и на для фронтальной области коры и описаны ранее в работе [3].

При анализе внутриполушарных связей (рис.2) обнаружено, что в поврежденном полушарии (где возникла волна РД) в период около 100 секунд повышается связность между соматосенсорной корой и ретроспелинальной, что предшествует периоду падения связности между полушариями после распространяющейся деполяризации.

Полученные данные указывают на высокую функциональную пластичность нейронных сетей в бодрствующем мозге и их быструю реорганизацию в ответ на одностороннюю дисфункцию. В клинических исследованиях показано, что РД регулярно возникает после острого повреждения головного мозга. Наш анализ показывает нарушение функциональных взаимодействий (связность) между разными областями коры после волны РД, значит можно предположить, что РД, возникающая в поврежденном мозге, может участвовать в патогенезе когнитивных нарушений у таких пациентов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-15-00327.

Литература

[1] *L. V. Vinogradova, E. M. Suleymanova, T. M. Medvedeva*, “Transient loss of interhemispheric functional connectivity following unilateral cortical spreading depression in awake rats”, *Cephalalgia*. 41(3), 2021, pp. 353-365.

[2] *A. Kraskov, H. Stögbauer, P. Grassberger*, “Estimating mutual information”, *Physical Rev. E*. 69, 2004, pp. 066138.

[3] *D. A. Lachinova, M. P. Smirnova, I. V. Pavlova, I. V. Sysoev, L. V. Vinogradova*, “Transient destabilization of interhemispheric functional connectivity induced by spreading depolarization”, *Network Neuroscience*. 8(4), 2024, pp. 1383-1399.

Поиск дельта- и тета-ритмов в радиотехнической модели таламо-кортикальной сети из осцилляторов ФитцХью-Нагумо

Н. М. Егоров[1,2,3], М. В. Сысоева[1], И. В. Сысоев[1]
[1]Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия,
[2]НИИ «НПП Итэлма», г. Москва, Россия,
[3]Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия,
egorov.n.m.omnis@gmail.com

Аннотация. *Задача изучения устройства головного мозга актуальна, так как её решение позволит понять происхождение различных нейродегенеративных болезней и ускорить разработку методов лечения данных заболеваний. Целью данной работы является моделирование электро-магнитной активности головного мозга, в частности нахождение дельта- и тета-ритмов, присутствующих в таламо-кортикальных структурах мозга в нормальных условиях во время сна или бодрствования. Основным подходом в настоящей работе является метод аналогового моделирования средствами схемотехники. В качестве модельного нейрона данной сети выступает радиотехническая реализация осциллятора ФитцХью-Нагумо в симуляторе электрических цепей NI Multisim. Связи между нейронами организованы через реализации сигмоидной функции гиперболического тангенса со смещением и задержкой для воспроизведения функции синапса. В результате была спроектирована сеть из 14 нейронов, проанализирована значимость параметров отдельных нейронов на активность всей сети, а также обнаружена активность, подобная дельта- и тета-ритмам головного мозга.*

I. Введение

Строение и принципы работы головного мозга являются важными темами для исследований в современном научном сообществе. Задача изучения и понимания на должном уровне процессов, происходящих в мозге, позволит ответить на ряд актуальных вопросов, связанных с пониманием человека, как самого себя, этиологии и разработки методов лечения различных заболеваний, принципов, лежащих в основе обработки информации и моделирования мышления. На настоящий момент научные работы на данную тему дают общее представление с некоторыми приближениями о том, что происходит внутри головного мозга во время той или иной ситуации, в частности во время сна или обучения.

Таким образом, современные исследования [1] описывают характерные медленные осцилляции электрической активности мозга, особенно выраженные в таламо-кортикальной сети, называемые дельта- и тета-ритмами, они играют ключевую роль в процессах сна, сенсорной обработки информации, памяти и других когнитивных процессах.

Обычно методы изучения делятся на два направления: изучение реального объекта и описание его математической моделью, и обратная задача изучения и анализа уже созданной модели с целью поиска новых свойств и явлений самого объекта.

В данной работе была разработана система из 14 радиотехнических осцилляторов ФитцХью-Нагумо в SPICE-симуляторе, воспроизводящая электромагнитную активность таламо-кортикальной сети головного мозга. Была проанализирована зависимость управляющих параметров на общее поведение сети, в том числе возбудимость сети и возможность генерации хаотической активности. Также были найдены нормированные аналоги дельта- и тета-ритмов, соответствующие состояниям сна и бодрствования.

II. Модель

В силу ограничений NI Multisim на количество вычислительных ресурсов и скорость моделирования, в данной работе модель сети ограничена 14 модельными нейронами, каждый из которых представляет собой суммарный сигнал некоторого количества реальных нейронов. В качестве одного модельного нейрона была выбрана система ФитцХью-Нагумо, описываемая уравнением (1). Радиотехническая реализация этого осциллятора была разработана и представлена в работе [2]. Функция связи между нейронами выполнена в виде гиперболического тангенса со смещением и задержкой с целью воспроизвести эффект тормозных и возбуждающих связей между нейронами различного типа. В модели сети нейроны играют роль нейронов нескольких типов, разница между типами модельных нейронов заключается в том, какие нейроны на какие и как могут воздействовать, при этом параметры у них остаются идентичными.

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{u}_i(t) &= u_i(t) - c_i u_i^3(t) - v_i(t) + \sum_{j \neq i} k_{ij} \frac{1 + \tanh(u_j(t-\tau)}{2}, \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t) + a_i - b_i v_i(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где u – безразмерная быстрая переменная, характеризующая трансмембранный ток, v – безразмерная медленная переменная, характеризующая ток восстановления, t – безразмерное время, ε – параметр инерционности, также отвечающий за масштабирование времени, a – безразмерный параметр, управляющий собственной динамикой нейрона, b – второй безразмерный параметр, управляющей динамикой нейрона, связанный с током восстановления, c – константа интегрирования, равная 1/3, k – коэффициент силы связи, τ – величина задержки, имитирующая задержку при прохождении сигнала через синапс.

III. Заключение

Расчёты проводились в соответствии с принципами аналогового моделирования средствами схемотехники. Использование данного подхода нацелено на синтез данной сети в железе, что в будущем позволит более точно воспроизвести физические эффекты, присущие реальным нейронам головного мозга.

В общем случае была спроектирована универсальная модель таламо-кортикальной сети осцилляторов ФитцХью-Нагумо. Структуру данной сети возможно программно переконфигурировать, изменяя значения силы связи, управляющих параметров, а также архитектуру соединений между нейронами. Остановившись на одной архитектуре сети, описанной в работе [3], было проведено множество симуляций с различными значениями параметров в процессе анализа влияния данных параметров на общую активность сети. В ряде частных случаев были обнаружены сигналы, подобные дельта- и тета-ритмам, наблюдающимся во время сна и бодрствования в таламо-кортикальной сети головного мозга.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №25-12-00176, https://rscf.ru/project/25-1200176/.

Литература

[1] *Ю. Д. Кропотов,* “Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия / перевод с англ. под ред. В.А. Пономарева. Донецк : Заславский А.Ю., 2010. 512 с.

[2] *N. M. Egorov, M. V. Sysoeva, M. V. Kornilov,·V. I. Ponomarenko, I. V. Sysoev*, “Hardware implementation of the ring generator with tunable frequency based on electronic neurons”, *Nonlinear Dynamics*, 112, 2024, pp.11471-11418.

[3] *N. M. Egorov, D. D. Kulminskiy, I. V. Sysoev, V. I. Ponomarenko, M. V. Sysoeva*, “Transient dynamics in electronic neuron-like circuits in application to modeling epileptic seizures”, *Nonlinear Dynamics,* 108, 2022, pp.4231-4242.

Исследование возбудимого режима дискретной рекурсивной модели нейрона

Д. И. Большаков, Д. В. Чиндарев, В. В. Матросов, М. А. Мищенко
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Россия,
denis.bolhakov@gmail.com, chindarev.daniil@mail.ru,

matrosov@rf.unn.ru, mischenko@neuro.nnov.ru

***Аннотация**. Исследование импульсных нейронных сетей на сегодняшний день является весьма перспективным направлением науки. Применение такого типа сетей показало высокую эффективность в задачах обработки и классификации изображений, акустических сигналов, сигналов биологической активности, а так в различных задачах робототехники (навигации, управления, взаимодействия с окружающим миром и т.п.). Одной из основных проблем такого типа сетей является их высокая вычислительная и производственная сложность. Данная проблема возникает вследствие использования в составе импульсных нейронных сетей большого количества моделей нелинейных нейроподобных генераторов и элементов нелинейных синаптических связей. Способом решения данной проблемы может быть использование новых менее ресурсоемких моделей нейроподобных генераторов и моделей синаптических связей. В данной работе проведено исследование возбудимого режима дискретной рекурсивной модели нейроподобного генератора. Данный режим является более важным, чем автоколебательный режим, при создании и исследовании моделей спайковых нейронов, так как он свойственен большинству биологических нейронов.*

I. Введение

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных задач междисциплинарной науки является проектирование и исследование нейроморфных устройств [1]. Разработка такой нейроморфной электроники позволит строить вычислительные устройства и системы обработки информации по новым принципам и с высоким уровнем параллелизма [2]. Нейроморфные устройства требуют разработки и исследования электронных компонентов (нейронов и синапсов), обладающих простой схемотехнической реализацией и низкой вычислительной сложностью.

II. Модель нейрона

В данной работе проводилось исследование новой дискретной рекурсивной модели нейроподобного генератора. Данная модель построена на основе дискретного преобразования основных функциональных характеристик нейроподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с полосовым фильтром. Эта модель была выбрана в качестве базовой, так как, с одной стороны, она обладает богатой колебательной динамикой [3,4], с другой стороны имеет сравнительно простую аппаратную реализацию [5], вследствие высокой распространенности систем ФАПЧ в современной аналоговой и цифровой технике.

Модель нейроподобного генератора на базе системы ФАПЧ с полосовым фильтром имеет ряд недостатков: в случае численного счета она имеет высокую вычислительную сложность, так как в непрерывном времени она описывается системой из трех нелинейных дифференциальных уравнений; в случае аппаратной реализации, тяжело (особенно в интегральном исполнении) создать достаточно большое количество идентичных по параметрам моделей вследствие разброса параметров элементной базы. Кроме того, вызывает сложности получение возбудимого режима, так как без изменения конструкции в данной модели такой режим реализуется только в области начальной частотной расстройки системы равной 0, т.е только в одной точке [6].

Предложенная модель построена на основе дискретного преобразования основных функциональных характеристик нейроподобного генератора на базе системы ФАПЧ с полосовым фильтром.

Математическая модель такой системы представлена системой дискретных уравнений (1):

$$Q_n = Q_{n-1} + c_{n-1}(S_{n-1} + i) - \overline{c_{n-1}}(S_{n-1} + i)$$

$$S_n = X_n - Y_n$$

$$X_n = 0.5(Q_n + X_{n-1}) \quad (1)$$

$$Y_n = (X_n - Y_{n-1})k + Y_{n-1}$$

$$c_n = (c_{n-1} \vee a) \wedge b$$

где Q_n - выход основного сумматора, имитирующего фазовый дискриминатор, S_n - выход петли обратной связи, выход системы, X_n - выход первого фильтра нижних частот, Y_n - выход второго фильтра нижних частот, c_n - условие направления счета (1 - считаем вперед, 0 - считаем назад), 0.5 - коэффициент затухания первого фильтра нижних частот, k - коэффициент затухания второго фильтра нижних частот, i - входное воздействие.

Первое и последнее уравнение системы (1) описывают характеристику фазового детектора. Для корректного расчета данной характеристики к данным уравнения необходимо добавить дополнительные условия (2), а на параметр Q_n ограничить в пределе от 0 до r (диапазон счета).

$$a = \begin{cases} 0, \text{если } Q_n \le 0 \\ 1, \text{если } Q_n > 0 \end{cases}, b = \begin{cases} 0, \text{если } Q_n \ge r \\ 1, \text{если } Q_n < r \end{cases}, Q_n = \begin{cases} 0, \text{если } Q_n < 0 \\ r, \text{если } Q_n > r \end{cases} \quad (2)$$

где a и b – дополнительные условия для выбора направления счета, r – параметр диапазона счета.

Второе, третье и четвертое уравнения системы (1) описывают характеристику рекурсивного полосового фильтра.

III. Исследование возбудимого режима генерации

При исследовании возбудимого режима генерации дискретной рекурсивной модели нейроподобного генератора, был выполнен анализ отклика модели на импульсное воздействие. Для этого параметру i модели было присвоено отрицательное значение близкое к нулю. При таком значении параметра i в системе наблюдается отсутствие автоколебаний в отсутствие внешних возмущений [7].

На рис. 1 изображены временные диаграммы, иллюстрирующие реакцию динамической системы на импульсное воздействие. Верхний сигнал S иллюстрирует отклик системы на входной сигнал. Нижний сигнал J — последовательность импульсов, поступающих на вход модели. Параметры A, τ, T и T_{resp} обозначают амплитуду, длительность, период следования импульсов и время отклика системы соответственно.

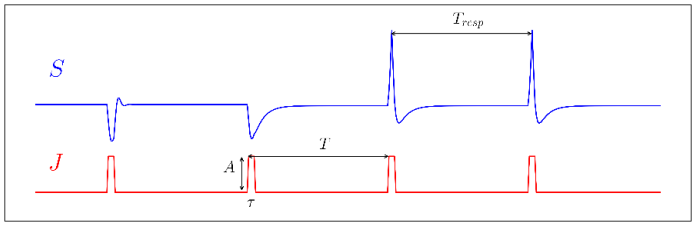


Рис. 1 Примеры временной диаграммы, иллюстрирующей реакцию динамической системы на импульсное воздействие

На рис. 2 представлены результаты исследования отклика дискретной рекурсивной модели нейрона на периодическую стимуляцию. График отражает зависимость отношения периода стимуляции к периоду ответа от амплитуды внешнего импульса. Наблюдаются ступенчатые

переходы между различными режимами отклика системы при изменении амплитуды. При малых амплитудах (A < 0.05) система не генерирует отклика (подпороговая стимуляция). С увеличением амплитуды появляются устойчивые режимы с определёнными значениями отношения периодов, что соответствует синхронизации.

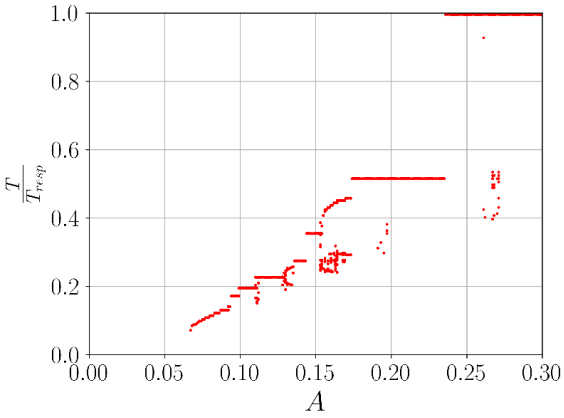


Рис. 2 График зависимости отношения периода стимуляции
к периоду ответа от амплитуды внешнего импульса

Наличие нескольких горизонтальных "плато" на графике свидетельствует о различных режимах синхронизации между стимулом и откликом.

Небольшие кластеры вне основных "плато" на графике связаны с переходными и нестабильными режимами работы модели. В этих областях система может демонстрировать сложную или нерегулярную динамику отклика.

IV. Заключение

В данной работе было проведено исследование возбудимого режима генерации дискретной рекурсивной модели нейроподобного генератора. Численный эксперимент показал нелинейный характер отклика модели нейрона, типичный для возбудимых систем, и подтверждил способность данной модели воспроизводить пороговые эффекты и режимы синхронизации, характерные биологическим нейронам.

Благодарности

При поддержке программы стратегического академического лидерства "Приоритет 2030" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Литература

[1] *J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, R. Huang,* “A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices”, *Appl. Phys. Rev.*, 7(1), 2020, pp. 011312.

[2] T. *Wunderlich, A.F. Kungl, E. Müller, A. Hartel, Y. Stradmann, S.A. Aamir, A. Grübl, A. Heimbrecht, K. Schreiber, D. Stöckel, C. Pehle, S. Billaudelle, G. Kiene, C. Mauch, J. Schemmel, K. Meier, M.A. Petrovici*, “Demonstrating Advantages of Neuromorphic Computation: A Pilot Study”, *Front. Neurosci. Frontiers*, 13, 2019, pp. 260.

[3] *V.D. Shalfeev*, “Investigation of the dynamics of a system of automatic phase control of frequency with a coupling capacitor in the control loop”, *Radiophys. Quantum Electron.*, 11(3), 1968, pp. 221–226.

[4] *М.А. Мищенко, В.Д. Шалфеев, В.В. Матросов*, “Нейроноподобная динамика в системе фазовой синхронизации”, *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 20(4), 2012, с. 122–130.

[5] *М.А. Мищенко, Д.И. Большаков, В.В. Матросов*, “Аппаратная реализация нейроподобного генератора с импульсной и пачечной динамикой на основе системы фазовой синхронизации”, *Письма в журнал технической физики*, 43(13), 2017, с. 10.

[6] *Д.И. Большаков*, *М.А. Мищенко, В.В. Матросов, И.В. Сысоев,* “Электронный нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом на основе системы фазовой автоподстройки частоты”, *Письма в журнал технической физики*, 48(9), 2022, с. 23.

[7] *М.А. Мищенко, Н.С. Ковалева, А.В. Половинкин, В.В. Матросов*, “Возбуждение фазоуправляемого генератора импульсной последовательностью”, *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика,* 29(2), 2021, с. 240–253.

Оценка точности алгоритмов определения ориентации вращающегося объекта с кодовыми маркерами на основе инструментальных измерений

Е. В. Иванова, Д. В. Еремин, А. Ю. Поройков
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
poroykovay@mpei.ru

***Аннотация**. Современные методы и алгоритмы компьютерного зрения позволяют проводить бесконтактные измерения положения и ориентации объекта в пространстве в режиме реального времени. Один из таких методов основан на использовании кодовых маркеров – искусственных меток со специальным рисунком, позволяющим робастно находить их положение на двухмерном изображении. Зная размер маркера и калибровочные параметры камеры, становится возможным определить положение и ориентацию в пространстве маркера или объекта с таким маркером. Несмотря на широкое распространение этого метода, вопрос в точности проводимых с его помощью измерений остается открытым. В настоящей работе предлагается оценить точность нескольких алгоритмов определения ориентации, основанных на применении кодовых маркеров, с помощью инструментальных измерений. Для измерения ориентации объекта был использован автоколлиматор и призма многогранная с 72 гранями. Результат оценки точности алгоритмов позволил выявить периодическую структуру зависимости ошибки от положения объекта, которая может быть связана со способом расположения маркеров на нем.*

I. Введение

Задача бесконтактного определения положения и ориентации объекта в пространстве встречается в аэрокосмической отрасли, машиностроении, робототехнике, медицине и в других областях. Для ее решения применяются радиочастотные [1], магнитные [2], акустические [3] и лазернодальномерные [4] методы. Они обладают рядом недостатков: низкая помехозащищенность, низкая точность и сложность измерения не статичных объектов. Наиболее распространенным способом для измерения положения и ориентации объекта в пространстве является использование инерциальных навигационных систем. Однако такие системы необходимо располагать непосредственно на измеряемом объекте, и они обладают дрейфом нуля. В качестве альтернативы вышеуказанным методам используют фотограмметрические методы [5], суть которых заключается в получении трехмерных координат объекта по его двухмерным изображениям. Для этого обычно используют два изображения объекта, полученных с разных ракурсов, например, с помощью стереопары видеокамер. Но существует подход и для получения информации о его положении и ориентации с помощью одного изображения с одной камеры, для этого используется дополнительная информация об объекте. Примером такого подхода служит применение кодовых маркеров, представляющих собой объекты со специальным рисунком, позволяющим робастно находить их положение на двухмерном изображении. Размер маркеров заранее известен, благодаря чему становится возможным измерять его (или объекта с закрепленным маркером) положение и ориентацию по одному изображению с одной камеры [6, 7].

II. Методы исследования

В качестве объекта исследования была использована свободновращающаяся по трем углам платформа на аэростатическом подшипнике. На платформу закреплены кодовые маркеры семейства ArUco [8]. Для получения изображений платформы с маркерами были использованы монохромные камеры Baumer VCXG-32M с разрешением 2048×1536 пикселей, размером пикселя 3,45 мкм и установленными объективами SV-0814H с фокусным расстоянием 8 мм.

Для определения ориентации платформы по ее изображениям было использовано три алгоритма. Первый основан на решении задачи PnP (Perspective-n-Point). В качестве двухмерных координат были использованы внешние углы маркеров, найденные стандартным алгоритмом. Соответствующие трехмерные координаты меток известны из геометрии их крепления на платформе и являются априорной информацией для всех трех алгоритмов.

Второй алгоритм основан на расчете трехмерных координат для каждого маркера в отдельности. После обработки всех маркеров для найденных трехмерных точек решалась задача RBT (Rigid Body Transformation) для определения текущего положения и ориентации платформы.

Третий алгоритм основан на расчете трехмерных координат для каждого маркера с помощью стереоскопического подхода. Для этого производилась триангуляция соответствующих углов маркеров, найденных на обоих изображениях стереопары. В качестве априорной информации для триангуляции были использованы результаты стереокалибровки.

Для возможности инструментального измерения ориентации платформы на нее была установлена призма многогранная (ПМ) с общим количеством граней равным 72, углом между гранями 5° и заявленным отклонением граней от номинального значения угла не более 15" (угловых секунд).

Для измерения ориентации платформы был использован автоколлиматор АКТ-15, имеющий заявленную инструментальную погрешность при двухкоординатных измерениях 15" (угловых секунд). Ориентация платформы определялась по визуальной фиксации отражения перекрестья автоколлиматора от граней многогранной призмы. Результаты определения ориентации платформы с помощью автоколлиматора сравнивались с результатами работы вышеуказанных алгоритмов, на основе чего и была произведена оценка точности измерения последних.

III. Заключение

В работе представлена методика оценки точности определения ориентации объекта с кодовыми маркерами по его изображениям на основе инструментальных измерений. Результат оценки точности позволил выявить периодическую структуру зависимости ошибки от положения платформы, которая может быть связана с периодическим расположением маркеров. Продолжение работы будет направлено на объяснение периодической структуры и попытку ее устранения, что должно уменьшить итоговую погрешность измерений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00469, https://rscf.ru/project/24-21-00469/.

Литература

[1] *Z. Sahinoglu, S. Gezici, I. Guvenc.* Ultra-wideband positioning systems: theoretical limits, ranging algorithms, and protocols. *Cambridge University Press*, 2008, 269 p.

[2] *F. Wu et al.*, “A new indoor positioning system using artificial encoded magnetic fields”, *The Journal of Navigation*. 71(2), 2018, pp. 299-316.

[3] *T. Aguilera, J. Aparicio, F. J. Álvarez*, “High availability acoustic positioning for targets moving in poor coverage areas”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 70, 2021, pp. 1-11.

[4] *S. Goel, B. Lohani*, “A motion correction technique for laser scanning of moving objects”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 11(1), 2014, pp. 225-228.

[5] *T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, J. Boehm*. Close-range photogrammetry and 3D imaging. *Walter de Gruyter GmbH & Co KG*, 2019, 843 p.

[6] *A. Yu. Poroykov, S. V. Lebedev, R. V. Kontsov, A. A. Sinitsyn, I. S. Zharenov*, “Object orientation measurement system without zero drift”, *J. Phys.: Conf. Ser*. 1636, 2020, p. 012030.

[7] *Е. В. Шматко, Н. Ю. Сивов, Д. В. Еремин, А. Ю. Поройков*, “Компьютерное моделирование влияния параметров оптической системы на погрешность определения ориентации и положения кодового маркера”, *Оптический журнал.* 91(7), 2024, с. 71-79.

[8] *S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, M. J. Marín-Jiménez*, “Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion”, *Pattern Recognition*. 47, 2014, pp. 2280-2292.

Прогнозирование сердечно-сосудистых событий по данным цифровой электрокардиографии

А. В. Фролов[1], Т. Г. Вайханская[1], А. П. Воробьев[1], О. П. Мельникова[1], В. П. Крупенин[2]

[1]Республиканский научно-практический центр «Кардиология»,
г. Минск, Республика Беларусь,
[2]Унитарное предприятие «Кардиан», г. Минск, Республика Беларусь,
Frolov.minsk@gmail.com

Аннотация. *Разработаны математические модели для прогнозирования неблагоприятных сердечно-сосудистых событий. В основе прогноза лежит феномен электрической нестабильности миокарда, выявляемый с использованием дисперсионных параметров цифровой электрокардиограммы.*

I. Введение

Сердечно-сосудистые заболевания широко распространены, однако неблагоприятные кардиоваскулярные события (КВС), такие как инфаркт миокарда, инсульт, кардиоэмболия и внезапная сердечная смерть, происходят лишь у 1–2% пациентов. У большинства же пациентов заболевание приобретает хронический эволюционный характер. С точки зрения нелинейной динамики КВС представляют собой скачкообразные изменения структуры патологического процесса. Поиск динамических предикторов КВС является ключевой задачей нового направления медицины — клинической кризологии [1].

Статистические данные свидетельствуют, что в 85–93% случаев КВС связаны с нарушениями сердечного ритма, такими как желудочковая тахикардия, фибрилляция желудочков и фибрилляция предсердий [2]. Основными механизмами аритмогенеза являются дефрагментация волны возбуждения, наличие дополнительных источников колебаний типа re-entry, фиброз миокарда и др. Совокупность этих факторов приводит к электрической нестабильности миокарда, которая проявляется в виде аномальных дисперсионных отклонений параметров электрокардиограммы (ЭКГ) [3–5]. В связи с этим при разработке прогностических моделей КВС целесообразно использовать цифровую ЭКГ высокого разрешения.

II. Цель исследования

Разработка и клиническая валидация математических моделей прогнозирования опасных нарушений сердечного ритма на основе анализа дисперсионных параметров цифровой ЭКГ высокого разрешения.

III. Методы и материал исследования

Нами был разработан аппаратно-программный комплекс для детального цифрового анализа ЭКГ. Он включает 12-канальный цифровой ЭКГ-коммуникатор, персональный компьютер и лазерный принтер. Комплекс обеспечивает высокоточное измерение ЭКГ-сигналов в диапазоне 0,03–5 мВ, входной импеданс > 10 Мом, коэффициент ослабления синфазной помехи 110 дБ, постоянная времени > 3,2 секунды, частота квантования 1000 Гц/канал, разрядность – 22 бита. Передача ЭКГ-сигналов осуществляется через интерфейс USB 2.0. На этапе предварительной обработки ЭКГ применяется комплекс адаптивных цифровых фильтров, устраняющих сетевые (50 Гц), мышечные (35 Гц) и дыхательные (<0,3 Гц) помехи с коэффициентом искажения нативного сигнала менее 5%. Для врачебного контроля предусмотрена функция «электронной лупы», позволяющая увеличивать амплитуду ЭКГ-сигнала до 30–40 мм/мВ [6].

Для оценки предикторов электрической нестабильности миокарда (ЭНМ) разработаны программные продукты: «Интекард 7.4» – предназначен для прогнозирования жизнеугрожающих

желудочковых аритмий и «Интекард 8.1» – используется для предсказания фибрилляции предсердий и оценки риска мозговых инсультов.

Прогностические математические модели были созданы на основе отбора независимых ЭКГ-предикторов с высокой прогностической ценностью и многофакторного анализа Кокса. При разработке моделей использованы данные 1244 пациентов с ишемической болезнью сердца и артериальной гипертензией, проходивших стационарное лечение в Республиканском научно-практическом центре «Кардиология» в период с 2019 по 2024 годы.

IV. Результаты

Сердечный цикл состоит из фаз деполяризации и реполяризации. Аномалии фазы деполяризации и реполяризации желудочков ассоциируются с высоким риском развития опасных желудочковых аритмий, тогда как нарушения деполяризации предсердий коррелируют с фибрилляцией предсердий и высоким риском инсульта мозга.

Для оценки ЭКГ-маркеров электрической нестабильности миокарда желудочков использовали ЭКГ-записи длительностью 2–5 минут в комбинации с программным обеспечением «Интекард 7.4» [7]. Анализ включал следующие предикторы: фрагментированный комплекс QRS, пространственный угол QRS–T > 105°, микроальтернация Т-волны > 45 мкВ, длительность комплекса QRS > 120 мс, дисперсия QRS > 40 мс, дисперсия QT > 70 мс и замедление сердечного ритма DC < 4,5 мс.

При поиске ЭКГ-маркеров электрической нестабильности предсердий использовали записи ЭКГ при нормальном синусовом ритме и программное обеспечение «Интекард 8.1». Анализ включал низкую амплитуду Р-волны (Pa < 0,1 мВ); увеличенную длительность Р-волны (Pd > 120 мс); полную межпредсердную блокаду (Pd > 120 мс с бифазной формой Р-волны); индекс «морфология–вольтаж–длительность» MVP > 2 баллов; площадь терминальной части бифазной Р-волны PTFV1< – 4 мВ·мс.

Риск-стратификация неблагоприятных КВС проводилась с использованием многофакторного анализа Кокса. Методика основана на наборе вышеупомянутых ЭКГ-маркеров $(x_1, x_2, \dots x_n)$, их пороговых значений и коэффициентах значимости $(a_1, a_2, \dots a_n)$, определяемых по соответствующим отношениям риска (**HR**). В зависимости от полученных значений риск КВС стратифицировали как низкий, средний, высокий или очень высокий (см. рисунок).

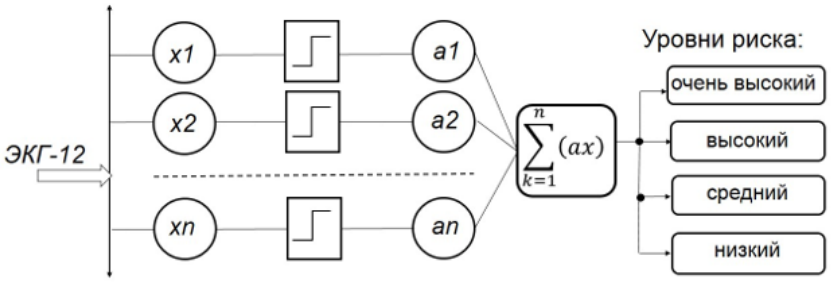


Рис. 1. Схема модели риск-стратификации неблагоприятных кардиоваскулярных событий по данным ЭКГ в 12 отведениях и маркеров электрической нестабильности миокарда

Прогностическая модель опасных желудочковых аритмий была разработана по результатам наблюдения за 1014 пациентами (средний возраст 50±15 лет) в течение 5 [2,1; 5,9] лет. В ходе исследования у 924 (91,1%) пациентов опасные желудочковые аритмии не регистрировались, тогда как у 90 (8,9%) пациентов они были зафиксированы. Независимыми предикторами, определёнными по данным ЭКГ, стали: фрагментированный QRS (HR = 4,3; 95% ДИ [3,5–6,3]); угол QRS-T (HR = 2,2; 95% ДИ [1,5–2,5]); микроальтернация Т-волны (HR = 4,1; 95% ДИ [2,2–6,2]); дисперсия QT (HR = 2,7; 95% ДИ [1,3–5,4]). Все предикторы имели статистически значимую ассоциацию с риском развития аритмий (p < 0,001). Модель показала хорошую прогностическую точность: площадь под

ROC-кривой – 0,856; чувствительность – 75%; специфичность – 77%; общая предиктивная точность – 77%.

При разработке прогноза скрытых форм фибрилляции предсердий проведено исследование среди 230 пациентов, страдающих ишемической болезнью сердца и/или артериальной гипертензией, средний возраст 63±10 лет, медиана наблюдения – 3,1 [2,5; 4,6] лет. В ходе наблюдения у 45 (19,6%) пациентов были зарегистрированы эпизоды фибрилляции предсердий.

Анализ выявил наиболее значимые независимые ЭКГ-предикторы развития данного состояния:

межпредсердная блокада (HR = 5,5; 95% ДИ [2,0–15,2]); амплитуда P-волны <0,15 мВ (HR = 5,5; 95% ДИ [2,0–15,2]); аномальная терминальная фаза PTFV1 < –5,7 мВ•мс ($p < 0,0001$).

Прогностическая эффективность модели: площадь под ROC-кривой – 0,956; чувствительность – 88%; специфичность – 97%; общая предиктивная точность – 92% ($p < 0,001$).

V. Заключение

Цифровая ЭКГ в сочетании с математическим моделированием раскрывает ранее недоступный потенциал прогнозирования критических состояний, таких как опасные желудочковые аритмии, инсульт и внезапная сердечная смерть. Использование разработанной информационной технологии способствует сокращению случаев преждевременной смертности среди пациентов кардиологического профиля. Технология успешно реализована на основе аппаратного и программного обеспечения серии «Интекард» белорусского производства [6,7].

Литература

[1] *В.Б.Симоненко, Е.А.Широков, В.М.Фролов*. *Клиническая кризология в кардионеврологии: руководство для врачей.*Москва, *Кворум*, 2013, 293 с.

[2] *H.Wellens, P.Schwatz, F.Lindeman et al.* Risk-stratification for sudden cardiac death: current status and challenges for the future. *Eur Heart J,* 2014, vol. 35(25), pp.1642 - 1651.

[3] *J.Lipponen, S.K|url, J.Laukkanen et al.* Global heterogeneity as a predictor of cardiovascular mortality in men and wome. *Europace,* 2018, vol. 20, pp.1841 - 1848.

[4] *R.Verrier, B.Nearing, A.D'Avila*. Spectrum of clinical applications of interlead ECG heterogeneity assessment: from myocardial ischemia detection to sudden cardiac death risk-stratification. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2021, doi:10.1111/anec.12894.

[5] *J.Goldberger, A.Baso, R.Bolneau, et al*. Risk-stratification for sudden cardiac death. A plan for the future. *Circulation,* 2014, vol. 129(4), pp. 516 - 526.

[6] *А.П.Воробьев, Т.Г.Вайханская, О.П.Мельникова и др.* Цифровой электрокардиографический комплекс для оценки электрической нестабильности миокарда и его возможности. *Современные технологии в медицине.* 2020, том 12(6), С. 15 - 20.

[7] *А.В.Фролов* Информационное обеспечение первичной профилактики внезапной сердечной смерти *Кардиология в Беларуси* 2022, том 14(2), С. 145 – 154.

Идентификация математической модели электронного нейрона по экспериментальным сигналам

И. В. Сысоев[1,2], Л. В. Такаишвили[1,2], В. И. Пономаренко[2,3]
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,
[2]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия,
[3]Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов, Россия,
sysoev_iv@spbstu.ru, nar7187@yandex.ru, ponomarenkovi@sgu.ru

Аннотация. *За последние тридцать лет были созданы несколько десятков электронных моделей нейронов и их модификаций. При этом математическое описание таких моделей часто является лишь приближённым, причём количественно точность этого приближения не определена. В настоящей работе предлагается подход к идентификации уравнений модели электронного нейрона, позволяющий восстановить некоторые параметры модели или их комбинации непосредственно по экспериментальным сигналам динамики в различных режимах. Подход основан на аппроксимации численно рассчитанного ряда второй производной выходного напряжения базисными функциями, записанными на основе уравнений Кирхгофа с рядом упрощений при описании диодов и операционного усилителя. Он позволяет идентифицировать как минимум две комбинации параметров и сопоставить их со значениями, ожидаемыми на основе значений номиналов используемых радиотехнических элементов.*

I. Введение

С момента публикации первой модели электронного генератора нейроподобной активности (электронного, или радиотехнического нейрона) [1] был разработан целый ряд натурных моделей разной степени сложности, способных генерировать сигналы, характерные для спайковых сетей. Условно все такие модели можно разделить на два класса: исходно аналоговые, для которых радиотехническая схема первична, а описывающие их уравнения написаны до или после приблизительно, так что прямое сопоставление модели и эксперимента требует учёта ряда упрощений и аппроксимаций, и исходно математические, представляющие по сути аналоговое или цифро-аналоговое конструирование исходной математической модели, записанной как правило в виде нелинейного осциллятора, в том числе с запаздыванием в собственной динамике. При этом сопоставление математической модели и объекта, как правило, проводится на довольно поверхностном уровне: качественно выявляется наличие ряда сходных режимов в некоторой области изменений 1-2 управляющих параметров, сопоставляется спектр колебаний. Задача данной работы — идентифицировать математическую модель нейрона, предложенного в работе [2] путём реконструкции по экспериментальным сигналам.

II. Модель и метод

Идентифицируемая модель представляет собою обобщённый осциллятор ван дер Поля (1), уравнения которого составлены в работе [2] на основе законов Кирхгофа с рядом аппроксимаций: диоды представлены как нелинейные сопротивления (на рассматриваемых частотах емкостными их свойствами мы пренебрегли), операционный усилитель является неидеальным, но его минимальный импеданс фиксируется.

$$\frac{d^2V_1}{dt^2}+\frac{dV_1}{dt}\left(\frac{R_4}{L_1}+\frac{(\rho+\rho_D)}{C_1}+\frac{V_1}{C_1}\left(\frac{d\rho}{dV_1}+\frac{d\rho_D}{dV_1}\right)\right)+\frac{V_1}{L_1C_1}(1+(\rho+\rho_D)R_4)=0 \qquad (1)$$

Величины ρ, ρ_D представляют собою нелинейные функции напряжения V_1 на выходе, которое единственное является измеряемою величиною. Проводимость $\rho(V_1)$ характеризует цепь операционного усилителя, а проводимость $\rho_D(V_1)$ — диодный контур. Эти функции и их производные подробно описаны в [2]. Величины C_1, L_1 и R_4 суть ёмкость, индуктивность и сопротивление колебательного контура.

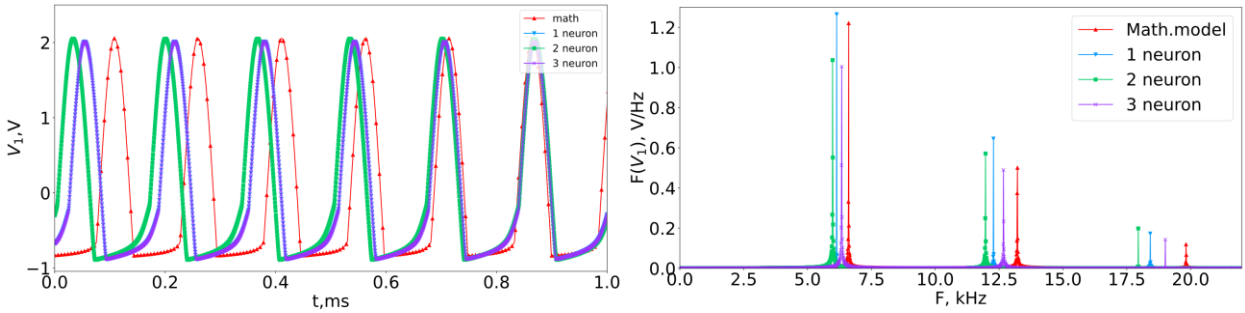
Временной ряд переменной V_1 измерялся экспериментально с помощью 16-разрядного АЦП LCard 502 с частотою выборки 2 МГц. Временные ряды первой и второй производных напряжения: $\frac{dV_1}{dt}$ и $\frac{d^2V_1}{dt^2}$ вычислялись методом последовательного дифференцирования со сглаживанием полиномом 2-го порядка по 31 точке.

Модель (1) представлялась в виде набора базисных функций $f_i(V_1, \frac{dV_1}{dt})$ от переменных $V_1, \frac{dV_1}{dt}$ и их сочетаний в соответствии с аппроксимациями, предложенными в [2] — всего $N = 9$ базисных функций. Далее решалась задача на наименьшие квадраты вида (2), где N — эффективная длина ряда после корректировок, вызванных сглаживанием.

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{D}\left(f_i\left(V_1(t_n), \frac{dV_1}{dt}(t_n)\right) - \frac{d^2V_1}{dt^2}(t_n)\right)^2 \to \min \qquad (2)$$

Всего рассматривались три радиотехнических нейрона, построенных в соответствии со схемою из работы [2], они были идентичны настолько, насколько это возможно — были использованы радиотехнические компоненты из одной и той же партии.

III. Результаты



(а) (б)

Рис.1. Временные ряды (а) и спектры мощности (б) сигналов трёх различных радиотехнических нейронов и их математической модели с параметрами, полученными усреднением эффективных реконструированных параметров. Видно, что модель с одной стороны близка к экспериментальным сигналам, с другой стороны имеет немного отличающуюся частоту и более высокую амплитуду

Процедура идентификации показала неполное соответствие модели экспериментальным сигналам, из 9 параметров надёжно с погрешностями не более 10% удалось идентифицировать только два: одни, отвечающий за частоту линейных колебаний и второй — за нелинейное затухание. При этом именно данные компоненты вносили самый значительный вклад в мощность сигнала. Результаты реконструкции для различных экземпляров различались, причём эти различия часто превышали различие между реконструированными и теоретически ожидаемыми значениями, то есть различия между конкретными экземплярами микросхемы оказались в ряде случаев больше, чем между математическою моделью и радиотехническою реализацией.

IV. Заключение

Использованный в данной работе подход к идентификации систем впервые был предложен в работе [3] и является довольно лобовым и не всегда эффективным на практике, как это обсуждалось

в [4]. Однако для представленной задачи оказался работоспособен за счёт нескольких факторов: относительной простоты уравнений, в которых из единственной наблюдаемой можно получить все переменные путём последовательного дифференцирования, высокой частоты АЦП, что позволило рассчитать временной ряд второй производной с приемлемою точностью, возможности записать базисные функции из известных теоретических соображений. В то же время предложенный подход позволил восстановить только некоторые из параметров схемы, например, параметр основной частоты линейных колебаний $\frac{1}{L_1 C_1}$. Идентификация позволила частично решить вопрос о степени до которой модель может соответствовать экспериментальной реализации: оказалось, что можно идентифицировать конкретный нейрон, так как их различие между собою достаточно, чтобы быть выявленным в процессе реконструкции по значениям параметров.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00176.

Литература

[1] *Mahowald, M., Douglas, R*, "A silicon neuron", *Nature*, 354, 1991, pp. 515–518.

[2] *Gouesbet, G., Letellier, C.*, "Global vector-field reconstruction by using a multivariate polynomial L2 approximation on nets", *Phys. Rev. E*, 49, 1994, 4955.

[3] *Takaishvili, L. V., Ponomarenko, V. I., Sysoev, I. V*. "Simple tunable generator of neuron-like activity". *Chaos, Solitons and Fractals*, 196, 2025, 116316

[4] *Bezruchko, B. P., Ponomarenko, V. I., Smirnov, D. A., Sysoev, I. V., Prokhorov, M. D.* "Class-oriented techniques for reconstruction of dynamics from time series", *Chaos, Solitons & Fractals*, 148, 2021, 110972.

Исследование коэффициента отражения радиоволн от водного раствора с примесями соли в емкости соизмеримой с длиной волны

Д. А. Овчинников[1], С. А. Баранов[1], Н. М. Барбин[1,2,3], В. Т. Куанышев[1]

[1]Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета связи и информатики, г. Екатеринбург, Россия,

[2]Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Россия,

[3]Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Россия,

oda@urtisi.ru, bsa@urtisi.ru, nmbarbin@mail.ru, kuan06@mail.ru

***Аннотация**. Вода является самым распространенным растворителем, изменяет свои свойства в зависимости от примесного состава, что позволяет использовать ее как датчик для косвенного отслеживания иных процессов. В работе выполнены измерения коэффициентов отражения радиоволн СВЧ диапазона от емкости с водным раствором, размеры которой соизмеримы с длиной волны. Отражение от такой поверхности носит сложный характер, который следует рассматривать как отражение от многослойных структур. При изменении коэффициента отражения можно судить об изменении комплексной диэлектрической проницаемости воды, и, как следствие, оценивать и фиксировать протекание каких-то иных процессов. Рассматриваемый метод отслеживания изменений состояния воды является бесконтактным, может применяться без оптической видимости объекта и на удалении от него, что выгодно отличает данный метод от других технологий. В работе, для оценки чувствительности рассматриваемого метода, использовался водный раствор с примесями соли NaCl. Важной особенностью исследования является его проведение не в лабораторных условиях (безэховая камера), а в условиях близких к реальному применению с множеством источников индустриальных помех. По результатам работы построен график зависимости коэффициента отражения от водного раствора с примесями соли, рассчитана погрешность измерений и сделаны выводы о чувствительности метода с привязкой к конкретному оборудованию, на котором выполнялись измерения.*

I. Введение

Вода самое распространенные вещество на планете. Является растворителем для множества веществ, поэтому в чистом виде практически не встречается. Из-за своей широкой распространенности обладает легкой доступностью и низкой стоимостью. По этой причине использование водных растворов для различных нужд является перспективным и экономически выгодным.

В рамках работы предлагается оценивать состояние воды с помощью радиоволнового изучения СВЧ диапазона. Метод является неразрушающим, быстрым, не требующим непосредственного контакта с объектом изучения и может выполняться на существенном удалении от него.

II. Описание эксперимента

Исследование выполнялось с помощью спектроанализатора БАРС ПЛ2 [1], для которого было разработано программное обеспечение специально для проведения эксперимента [2]. Для линейно частотно модулированного сигнала (ЛЧМ) использовался генератор ВЧ Г4-80 [3], перестройка частоты которого осуществлялась с помощью шагового двигателя, управляемого с персонального компьютера. Излучение и прием радиоволн осуществлялся посредством рупорных антенн [4]. Исследуемая ячейка была собрана из оргстекла, ее геометрические размеры длина – 58 см, высота – 43 см, ширина (глубина) 5,5 см. Общий объём водного раствора 13 литров. Антенны располагались на расстоянии 40 см от стенки емкости, что соответствует дальней зоне антенн. Съем показаний выполнялся в автоматическом режиме с выводом результатов в виде таблицы.

Измерялся коэффициент отражения от передней стенки емкости в зависимости от солености водного раствора. Шаг добавления соли 40 грамм, что соответствует шагу увеличения солености примерно на 0,3%.

Измерения выполнялись в диапазоне частот от 2500 МГц до 3000 МГц с шагом 1 МГц, выбор данного диапазона обсуждался в [5]. На частотах от 2570 МГц до 2620 МГц фиксировалось излучение сотовых базовых станций 4G, чтобы нивелировать их излучение мощность ЛЧМ сигнала была установлена заведомо выше и в итоговый результат принимались только сигналы, которые мощнее, чем фоновое излучение сотовых базовых станций.

III. Оценка погрешности измерений

Для оценки погрешности измерения использовалась методика изложенная в [6]. Погрешность оценивалась два раза: для графиков, построенных в частотной области и для графика зависимости среднего коэффициента отражения от солености раствора. Критерий надежности Стьюдента для всех случаев был выбран 0,999.

Погрешность измерения спектроанализатора, согласно паспортным данным, составляет 0,08%. Погрешность установки частоты генератора (0,5%), погрешность установки амплитуды 0,09%.

В случае построения усредненного коэффициента отражения (рис.1) расчет велся по 500 отсчетам, погрешность составила 0,72%.

IV. Обработка результатов эксперимента

При обработке результатов измерений учитывалась диаграмма направленности антенн, расстояние от антенны до измерительной емкости и общий уровень радиошума. В результате пересчета абсолютных показателей уровня сигнала, зафиксированного прибором, был получен коэффициент отражения радиоволны от водного раствора в зависимости от его солености (рис. 1).

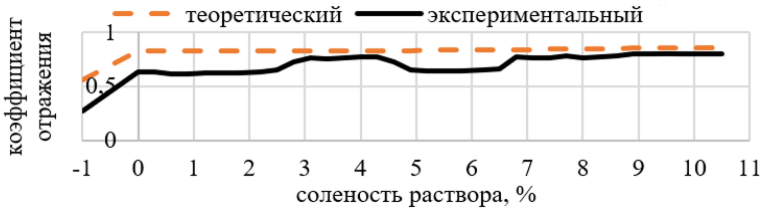


Рис. 1. Зависимость отражения радиоволны от водного раствора разной солености

Согласно расчетам, выполненным по методике [7], коэффициент отражения должен линейно возрастать от 0,83 до 0,86 для емкости с водным раствором, коэффициент отражения от пустой емкости составляет 0,56.

График, построенный в результате эксперимента, показывает, что общий наклон роста кривой аналогичен теоретическому. Однако, наблюдается резкий всплеск коэффициента отражения с 0,65 (соленость 2,5%) до 0,76 (соленость раствора 3,1%); и второй всплеск с изменением коэффициента отражения с 0,67 (соленость раствора 6,5%) до 0,78 (соленость раствора 6,8 %). Также наблюдается резкий спад с 0,77 (соленость 4,3%) до 0,65 (соленость 4,9%), вероятно мог быть второй спад, если продолжить увеличивать соленость раствора. В ранее выполненном исследовании, с емкостью другого размера, также наблюдался аналогичный эффект по увеличению и спаду коэффициентов отражения при линейном увеличении солености водного раствора [8].

V. Заключение

Метод интроскопии радиоволнами, при конкретном применении, ограниченный чувствительностью приборов и погрешностью измерений позволяют оценивать изменение солености раствора на 0,3%.

Согласно измерениям, коэффициент отражения возрастает нелинейно, имеются области с резко увеличивающимся коэффициентом отражения. По предположению авторов, данное явление связано не столько с геометрической формой объекта (резонансами емкости), сколько со взаимодействием молекул воды и соли в переменном электромагнитном поле, их поляризацией.

К сожалению, в рамках выбранной частотной области не удалось выявить закономерности, которые бы позволили однозначно определить коэффициент отражения в возрастающем или спадающем фронте кривой коэффициента отражения.

Стоит заметить, что математический аппарат для аналитического расчета, предлагаемый авторами [7, 9], имеет большое расхождение с практически измеренными значениями в рамках конкретной используемой емкости, результаты которой можно экстраполировать на все емкости, которые имеют небольшие габариты ширины.

Благодарности

Исследование проведено в рамках государственного задания СибГУТИ (соглашение № 071-00003-25-00).

Литература

[1] Технические характеристики БАРС ПЛ2, Pandia.ru. *https://pandia.ru/text/80/162/44853-9.php* (дата обращения 28 января 2025 г.)

[2] Клиент и эмулятор Барс-ПЛ2, GitHub. *https://github.com/levkopo/barsik* (дата обращения 15 апреля 2025 г.)

[3] Генератор высокочастотных сигналов Г4-80. (1984). [Онлайн]. Доступно: *https://nd-gsi.ru/grsi/030xx/03872-13.pdf*

[4] *Д.Н. Коваль*, “Измерительные антенны (рупорные)” *Protehnology.ru. https://www.protehnology.ru/antenny-izmeritelnyerupornye-p6-404* (дата обращения 24 апреля 2025 г.)

[5] *Д.А. Овчинников, С.А. Баранов, Н.М. Барбин, В.Т. Куанышев*, “Исследование коэффициента отражения радиоволн в зависимости от геометрических размеров емкости”, в сборнике: *Информационные технологии и когнитивная электросвязь*, 2024 г., стр. 100-102.

[6] *О.В. Козачкова*, “Обработка результатов измерений”, *Учебное пособие, Благовещенск*, 2018, стр. 14-18.

[7] *Л.М. Бреховских*, “Волны в слоистых средах”, 2-е изд., *Москва: Наука*, 1973, стр. 52-93.

[8] *D.A. Ovchinnikov, S.A. Baranov, N.M. Barbin, V.T. Kuanishev*, “Identification of the amount of salt impurities in an aqueous solution in a container of finite size using radioiscopy”, В сборнике: *Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2024)*, 2024 г., стр. 16-18.

[9] Рекомендация МСЭ-R P.527-4 Электрические характеристики распространения радиоволн серии P на поверхности Земли. (06/2017). [Онлайн]. Доступно: *https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-4-201706-I!!PDF-E.pdf* (дата обращения: 29 января 2024 г.)

Электрохимические датчики механических движений на основе углеродных микроструктур для медицинских применений

В. М. Агафонов, В. В. Левчук, И. В. Егоров
Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия,

I. Введение

Высокочувствительные датчики движения с рабочей полосой частот, включающей низкочастотную область, нашли применение в общей и спортивной медицине для мониторинга сердечной деятельности (частота сердечных сокращений, вариабельность сердечного ритма), мониторинга дыхательной деятельности, измерения скорости распространения и формы пульсовой волны.

Большинство исследований и коммерческих решений основаны на применении МЭМС акселерометров и гироскопов, а также миниатюрных пьезоэлектрических датчиков. Получаемые с их помощью данные содержат полезную для указанных применений информацию, однако характеризуются не очень высоким отношением сигнал/шум. Фундаментально данное обстоятельство связано с низкой чувствительностью используемых датчиков в области часто от десятых долей до первых десятков Герц.

Известна технология измерения механических движений, использующая электрохимический принцип преобразования сигналов, получившая также название молекулярно-электронный перенос [1,2]. Достоинством молекулярно-электронных приборов является способность регистрировать движения нанометрового уровня в низкочастотной части спектра. Основные применения сейчас связаны с сейсмологией и сейсморазведкой [3,4]. Здесь технология доказала ряд существенных преимуществ по сравнению с аналогами, созданными на других принципах. При этом применение технологии молекулярно-электронного переноса не ограничено сейсмикой, в частности, потенциал имеют области, связанные с медицинской и спортивной диагностикой Ограничениями на момент первых попыток использования этих датчиков в медицине [5] были относительно большие габариты, а также высокая стоимость.

Ситуация изменилась в последние годы. Связано это с тем, что перспективы направления побудили исследователей из ряда лабораторий в России, Китае и США направить свои усилия на поиск новых решений для создания датчиков на базе микроэлектроники и лазерной микрообработки [1-4], [8-10]. В результате, были созданы десятки новых конструкций электрохимических ячеек с высокими выходными параметрами и характерными размерами менее 1 мм. Кроме того, чувствительный элемент и корпус датчика удалось сделать гибкими, что упрощает его крепление на теле человека.

II. Электрохимического датчика с углеродными электродами на гибкой подложке

В настоящей работе представлены результаты создания электрохимического датчика с углеродными электродами на гибкой подложке, исследованы частотные характеристики некоторых конфигураций чувствительного элемента, а также представлены натурные данные по регистрации дыхания и сердцебиения человека.

Для экспериментальных исследований использована электрохимическая ячейка с электродами, изготовленными на стенках цилиндрического канала (Рис. 1). Данный тип преобразующего элемента состоит из двух параллельных гибких подложек, разделенных прокладкой. На сторонах каждой подложки изготовлены электроды в виде проводящего углеродного слоя. Также в пластинах изготовлена сетка в виде множества отверстий круглого сечения малого диаметра (порядка 40 мкм), обеспечивающих ток рабочей жидкости сквозь преобразующий элемент. Каждое такое отверстие есть цилиндрический канал, в котором жидкость электролита переносит ионы между электродами.

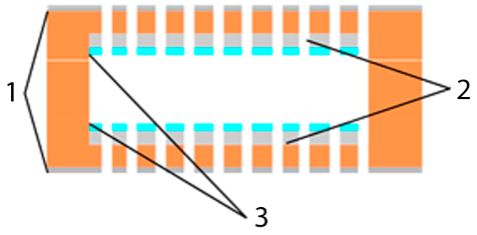


Рис. 1. Схема чувствительного элемента с цилиндрическими каналами:
1 – аноды, 2 – катоды, 3 – диэлектрический слой

Собранный датчик снабжался электромагнитным актуатором (Рисунок 2): на одну из мембран прибора крепился магнит, вблизи которого располагалась катушка. Такая конструкция позволяет преобразовывать колебания тока в катушке в механические колебания электролита в преобразующем элементе, тем самым моделируя внешние воздействия заданном диапазоне частот.

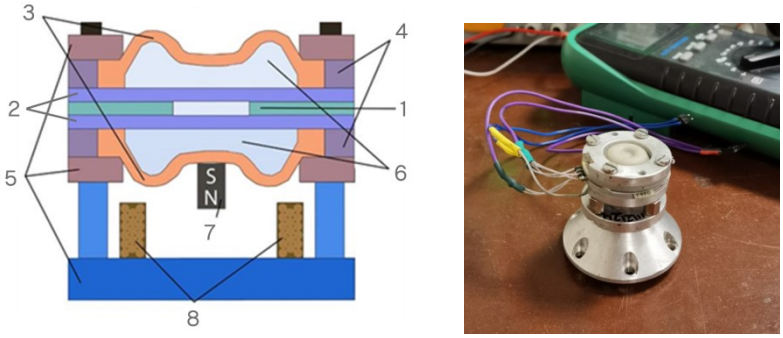


Рис. 2. Схема установки (слева): 1 – прокладка, 2 – подложки, 3 – мембраны,
4 – ограничительные кольца, 5 – фланцы и держатель катушки, 6 – раствор электролита,
7 – магнит, 8 – катушка; фотография установки (справа)

На рисунке 3 приведены амплитудно-частотные характеристики для двух типов преобразующих элементов, различающихся количеством отверстий. Зеленым цветом представлены представлены АЧХ для образцов с 5000 отверстий, а в красным с 2500 отверстиями. Диаметр отверстий на входе лазерного пучка 45±5 микрон, на выходе 41±5 микрон. Толщина слоя стеклотекстолита 0.1 мм, толщина слоя углеродный пасты посл отжига 45±3 микрон. Сравнение кривых показывает, что на частотах ниже 100 Гц увеличение числа отверстий приводит к росту чувствительности, а на более высоких частотах графики практически совпадают.

Натурные испытания показали, что прибор способен уверенно регистрировать параметры сердечной и дыхательной деятельности человека. На Рисунке 4, слева, представлена запись процесса сердцебиения, зарегистрированного прибором, закрепленным на груди человека в состоянии покоя. На Рисунке 4, справа, представлен спектр сигнала, где хорошо видны пики, отвечающие частоте пульса и дыхания.

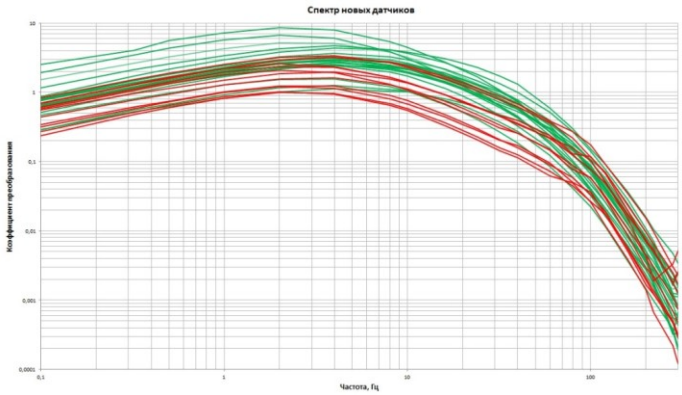


Рис. 3. Набор экспериментальных амплитудно-частотных характеристик электрохимических сенсоров

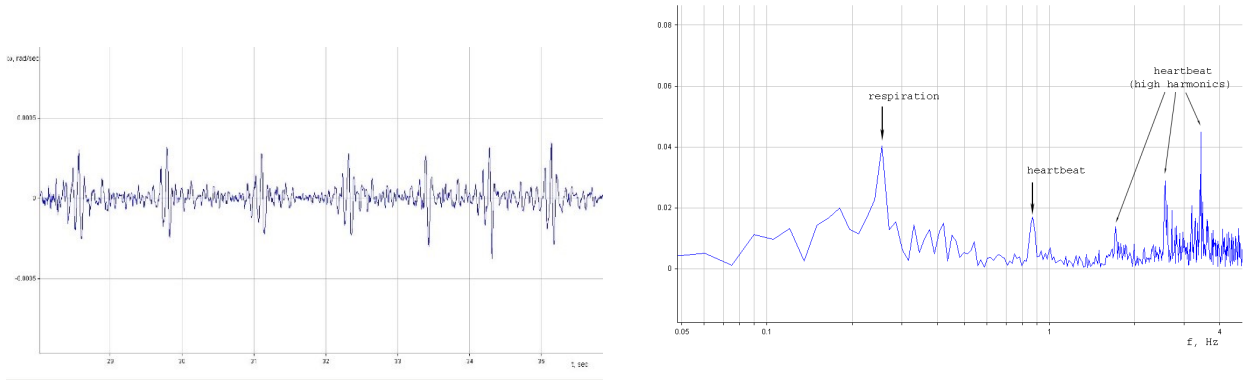


Рис. 4. Записи процессов сердцебиения и дыхания, полученные с помощью, молекулярно-электронного измерителя, справа – исходная запись, слева спектра спектр

Еще одним достоинством использования молекулярно-электронных датчиков в медицине является то, что принципиально их работа основана на электрохимических измерениях, что позволяет эффективно совмещать их на уровне схем измерительной электроники с другими измерениями, такими как ЭКГ, импедансометрия.

Литература

[1] *B. Liu et al.*, “An Electrochemical Angular Micro-Accelerometer Based on Miniaturized Planar Electrodes Positioned in Parallel,” *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 19, pp. 21305–21313, 2021.

[2] *Y. K. Cheung and H. Yu*, “Electrochemical Tilt Sensors with Symmetric Concentric Electrode Pairs,” *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 19, pp. 21322–21329, 2021.

[3] *A. A. Krylov et al.*, “Ocean-bottom seismographs based on broadband met sensors: Architecture and deployment case study in the arctic,” *Sensors*, vol. 21, no. 12, 2021.

[4] *Ч. А. В. Абдулвалиев М. Т., Тиссен А. П., Толкачев В. М.*, “Первая отечественная нодальная бескабельная система «Открытие» с электронно-молекулярными датчиками,” *Приборы и системы разведочной геофизики*, vol. 3(66), pp. 46–51, 2020.

[5] *D. Zaitsev, et al.*, “High resolution miniature MET sensors for healthcare and sport applications,” in *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST*, 2019, vol. 2018, pp. 287 – 292.

[6] *J. S. Stefano et al.*, “Different approaches for fabrication of low-cost electrochemical sensors,” *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 32, p. 100893, 2022.

[7] *W. Qi et al.*, “Mems-based electrochemical seismometer with a sensing unit integrating four electrodes,” *Micromachines*, vol. 12, no. 6, 2021.

[8] *V. M. Agafonov, V. A. Agafonova, and I. V Egorov*, “Comparison of Electrochemical Motion Sensors With Platinum and Carbon Electrodes,” *IEEE Sensors Lett.,* vol. 8, no. 03, pp. 3–6, 2024.

Система электромагнитного мониторинга объектов критической инфраструктуры L, S, C диапазонов частот

К. А. Вытовтов, М. Г. Иванов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
vytovtov_konstan@mail.ru

***Аннотация**. В работе представлена автоматическая система электромагнитного мониторинга объектов критической инфраструктуры энергетической, транспортно-логистической, гражданско-строительной и других отраслей. Предложенная система основана на пассивном методе пеленга направления прихода радиочастотного излучения, что в значительной степени повышает её электромагнитную совместимость с инфокоммуникационным оборудованием и упрощает процесс внедрения системы в существующую инфраструктуру. Комплекс мониторинга состоит из двух подсистем сканирования и сопровождения, позволяющих с высоким быстродействием обнаруживать БПЛА в широком секторе обзора и точно отслеживать их перемещения в нем. В работе приведена архитектура такой системы, предложен вариант технической реализации радиолокационного маяка, дана оценка основных характеристик дальности работы.*

I. Введение

Современное развитие робототехники и беспроводных сетей связи привело к широкому распространению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Их основными преимуществами являются, низкая себестоимость, высокая маневренность, безопасность эксплуатации, а также универсальность и возможность применения для решения широкого круга задач [1-2]. Вместе с этим повсеместное использование беспилотных аппаратов приводит к необходимости их отслеживания и контроля, в том числе в условиях скрытного перемещения. Существующие на сегодняшний день системы радиоэлектронной разведки не способны эффективно решать поставленные задачи ввиду высокой себестоимости, пониженной электромагнитной совместимости (в случае активных и полуактивных систем), а также малой отражающей способности дронов и специфического спектрального портрета [3]. Таким образом, актуальной на сегодняшний день является задача мониторинга электромагнитной обстановки воздушного пространства, обнаружения источников излучения и последующего их отслеживания.

II. Постановка задачи

Задача мониторинга сводится к обнаружению беспилотного летательного аппарата в области воздушного пространства и его последующему сопровождению. Большинство БПЛА предполагает использование беспроводных каналов видеосвязи, телеметрии и управления, преимущественно лежащих в L, S, C -диапазонах частот и определяющих полосу работы системы [4]. Дальность обнаружения таких систем зависит с одной стороны от мощности, излучаемой аппаратом, и собственной чувствительности системы, с другой – от мощности внешних электромагнитных помех, способных достигать в плотно населенных районах городской застройки величин до 10-20 мкВ/м [4-5]. Последние ограничивают потенциальную дальность работы системы до 5-10км [5], что, тем не менее, позволяет эффективно применять такие системы для мониторинга инфраструктурных объектов площадью до 20 км^2.

III. Принцип действия и структура системы

Описанные выше ограничения определяют структуру системы электромагнитного мониторинга L, S, C диапазонов частот (Рис. 1). Так как наличие беспилотного летательного аппарата в области мониторинга заранее неизвестно, необходима система сканирования, представляющая собой быстродействующий широкополосный приемник электромагнитного излучения. Как только в

обозреваемой области появляется излучающий объект, система сканирования принимает решение об обнаружении и передает приблизительное целеуказание системе сопровождения. Последняя предназначена для точного определения координат объекта и последующего его сопровождения. При потере положения объекта или выходе его за пределы визируемой области, система возвращается в режим сканирования. Каждая из указанных систем представляет собой сеть радиолокационных сканирующих и сопровождающих маяков, объединенных общим центром управления, в котором производится обработка данных от каждого маяка и вывод на информирующее устройство.

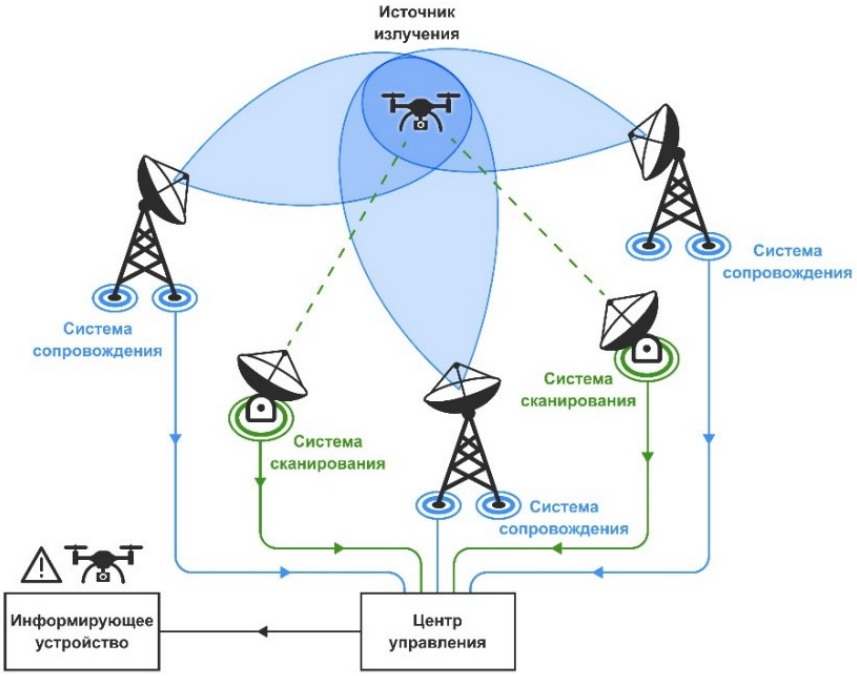


Рис. 1. Структура системы электромагнитного мониторинга

Ранее была подробно описана структура и принцип действия радиолокационных маяков подобной системы [6]. Выходной информацией каждого i-го маяка (Рис. 1) являются углы азимута и места (φ_i, θ_i) обнаруженного источника радиоизлучения относительно локальных координат маяка. Пересчет в декартовы координаты и их сопоставление с координатами местности производится в центре управления путем решения системы i- зависимых уравнений:

$$\begin{cases} f_1(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i) = 0 \\ f_2(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i) = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ f_i(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

избыточность которой обусловлена повышением характеристик обнаружения.

IV. Испытание экспериментального макета

На основе приведенной математической модели был разработан экспериментальный макет радиолокационного маяка, являющегося базовой структурной единицей систем сканирования и сопровождения. В основе работы каждого маяка лежит амплитудно-разностный метод определения углового направления прихода излучения. Для устойчивой работы системы и повышения точности определения координат предполагается строить сети из 3-7 маяков, соединенных с центром управления оптоволоконными линиями. Последние позволяют с высоким быстродействием передавать угловые координаты цели и значительно упрощают задачу взаимной синхронизации маяков. Лабораторный эксперимент показал возможность получения высокой пространственной селективности системы путем увеличения числа маяков в сети.

V. Заключение

В данной статье описана автоматическая система электромагнитного мониторинга воздушного пространства L, S, C диапазона частот. Ее отличительной особенностью является работа в пассивном режиме, благодаря чему достигается высокая электромагнитная совместимость с существующим инфокоммуникационным оборудованием. В основе предложенной системы лежит описанный авторами ранее радиолокационный маяк [6]. Благодаря гетерогенной архитектуре система способна проводить сканирование большого пространства с высокой скоростью, а при обнаружении излучающего объекта – с высокой точностью определять его координаты. Предложенная система может быть полезна в задачах электромагнитного мониторинга объектов критической инфраструктуры: АЗС, аэропортов и посадочных полос, медучереждений и т.п.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00926, https://rscf.ru/project/25-29-00926/

Литература

[1] *Mohsan, S.A.H., Othman, N.Q.H., Li, Y. et al.* Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intel Serv Robotics* 16, 109–137 (2023).

[2] *Kulikova M.E., Drobkova O.S., Platonov P.V.* Technological Progress in the Field of Unmanned Aerial Vehicles: Retrospective and Forecast, Proc. of 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2025, pp. 1-5.

[3] *Hamdalla M. Z. M. et al.* Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect //Progress in *Electromagnetics Research* M. – 2022. – T. 112.

[4] *Hamdalla M. Z. M., Caruso A.N., Hassan A.M.* Electromagnetic compatibility analysis of quadcopter UAVs using the equivalent circuit approach, *Journal of Antennas and Propagation*, vol. 3, pp. 1090-1101, 2022.

[5] *Chao Tang et al.* Analysis of the relationship between electromagnetic radiation characteristics and urban functions in highly populated urban areas, *Science of the Total Environment*, Vol. 654, pp. 535-540, November 2018.

[6] *Вытовтов К.А., Барабанова Е.А., Иванов М.Г.* Локальная радиолокационная система навигации для привязных высотных платформ / *Автоматизация в промышленности* 2024. № 06.

Моделирование бесконтактной системы мониторинга жизненно важных показателей человека и анализ полученных результатов с использованием нейронных сетей в математической среде Engee

Д. А. Балакин, М. Р. Акмалов, А. Р. Горбунов
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва Россия,
dabalakin@yandex.ru, akmalov.m@yabdex.ru, Gorbunov360v@mail.ru

***Аннотация**. Для выявления ухудшения состояния пациента используется мониторинг жизненно важных показателей (ЖВП), включая частоту сердечных сокращений (ЧСС) и частоту дыхания (ЧД). Стремясь сделать диагностику и наблюдение комфортнее для пациентов, современная медицина все чаще обращается к новым технологиям. Особенно перспективным в этом контексте является развитие бесконтактных методов контроля основных физиологических параметров. Данные системы не только минимизируют физический контакт, но и позволяют непрерывно отслеживать состояние человека. В работе представлен сквозной процесс разработки системы бесконтактного мониторинга, основанный на методологии модельно-ориентированного проектирования (МОП) [2]. Процесс охватывает этапы от создания многоуровневых моделей, описывающих физические процессы, до обработки и анализа полученных данных с применением нейронных сетей. Принципиально важным аспектом является интеграция всего процесса разработки – от моделирования до анализа результатов – в рамках единой математической среды Engee, которая сама по себе выступает как интегрированная платформа разработки.*

I. Введение

В мире постоянного технологического развития и научных открытий медицинская сфера не остается в стороне. Важнейшей частью этого прогресса становятся системы обнаружения и мониторинга жизненно важных показателей организма, играющие ключевую роль в охране здоровья и спасении жизней. В этой стремительной эволюции технологий радарные системы выделяются своей универсальностью и эффективностью в области бесконтактного мониторинга физиологических параметров, таких как частота сердечных сокращений и частота дыхания. В связи с этим в данной работе рассматривается разработка бесконтактной системы мониторинга на основе FMCW-радара, включая моделирование физических процессов распространения и отражения радиолокационного сигнала от тела человека. Весь процесс разработки – от создания моделей радара и канала распространения до алгоритмов обработки сигнала – реализуется в рамках методологии модельно-ориентированного проектирования [1]. Для решения сложной задачи выделения физиологических сигналов (ЧСС, ЧД) из зашумленных радиолокационных данных применяются современные методы искусственного интеллекта, в частности, глубокие нейронные сети.

II. Моделирование бесконтактной системы мониторинг жизненно важных показателей человека в математической среде Engee

С целью детального исследования концепции бесконтактного мониторинга до стадии физической реализации применяется методология модельно-ориентированного проектирования. В соответствии с подходом, в математической среде Engee строится сквозная имитационная модель, интегрирующая биомеханику движения грудной клетки человека, среду распространения и излучающий радар непрерывного излучения с линейно частотной модуляцией (ЛЧМ) [2].

Модель грудной клетки воспроизводит движения грудной поверхности тела с учетом двух физиологических процессов: дыхательной активности и сердечных сокращений. Дыхательный

компонент задается периодической функцией с амплитудой 5-15 мм и частотой 0,1-0,6 Гц, математически описывающей экскурсию грудной клетки при вдохе-выдохе. Сердечная компонента моделируется как высокочастотные микродвижения с амплитудой 0,1-1 мм и частотой 0,8-2 Гц. Для повышения достоверности модель учитывает вариабельность сердечного ритма (ВСР) и нелинейность дыхательного цикла. На Рис. 1 представим модель легких в математической среде Engee [3].

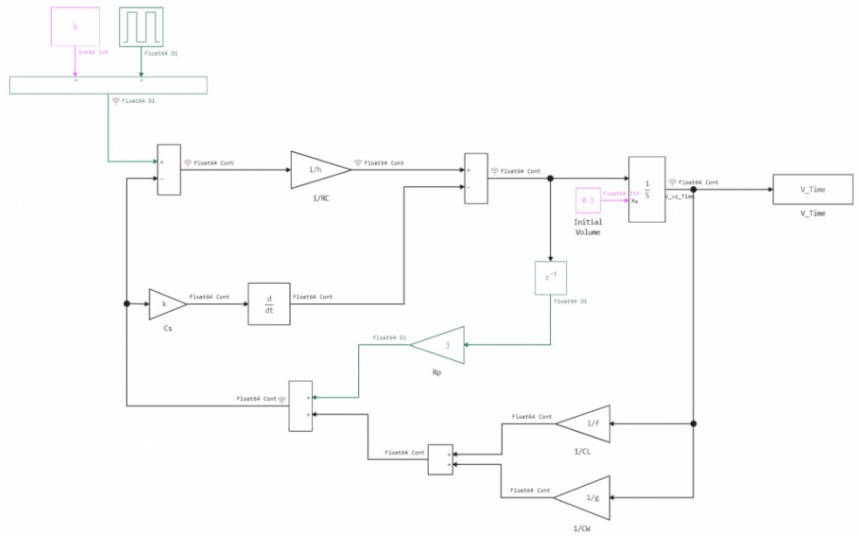


Рис.1. Модель легких в математической среде Engee

Радар непрерывного излучения с линейно частотной модуляцией выбран для бесконтактного мониторинга ЖВП благодаря высокой точности измерения дистанции и чувствительности к микродвижениям. В математической среде Engee реализован полный цикл генерации зондирующего сигнала, который позволяет моделировать его распространение в среде, отражение от динамически изменяющейся поверхности грудной клетки и прием отраженного сигнала радаром.

Критически важным для оценки реалистичности и устойчивости разрабатываемой системы является моделирование среды распространения. В рамках сквозной модели в Engee воссоздаются условия, приближенные к реальным учитывается затухание сигнала в пространстве, влияние различных материалов между радаром и пациентом, а главное – моделируется широкий спектр помех, параметры которых можно варьировать.

При детектирование полученного сигнала радаров традиционные методы цифровой обработки сигналов не всегда оказывает эффективным и надежным. Для решения этой задачи в разрабатываемой системе применяются метод искусственного интеллекта, а именно – глубокие нейронные сети (ГНС).

III. Обработка сигналов на основе нейронных сетей

Выделение физиологических сигналов, в первую очередь сердечного ритма, из зашумленных данных FMCW-радара представляет собой сложную задачу, решаемую в разрабатываемой системе с помощью комбинированного подхода, завершающегося применением глубоких нейронных сетей. Процесс начинается с предобработки полученного I и Q составляющие сигнала с использованием метода оценки эллипса [4]. Данный метод определяет параметры эллипса, которые позволяют нормализовать, центрировать, масштабировать сигнал, что позволяет устранить артефакты, связанные с исходным положением пациента и расстоянием до радара.

Из нормализованного комплексного сигнала извлекается фаза, несущая информацию о микро-движениях поверхности грудной клетки. Фаза прямо пропорциональна расстоянию до отражающей поверхности. Последующее вычисление второй производной от этого расстояния по времени дает ускорение грудной клетки. Это ускорение является основным носителем информации о физиологической активности.

Сигнал ускорения представляет собой нестационарный ряд, где полезные компоненты смешаны с артефактами и подвержены взаимной модуляции. Для решения задачи декомпозиции успешно применены глубокие нейронные сети. Учитывая природу сигнала, использовались архитектуры 1D-CNN и LSTM. ГНС демонстрируют высокую точность детектирования ЧСС, эффективно решая проблему его маскировки дыханием и шумами благодаря способности к нелинейному разделению компонентов в скрытых представлениях и адаптивности к вариабельности физиологических процессов.

Для реконструкции радарного сигнала в ЭКГ используется подобранная ИНС сверточного типа, построенная на базе популярной модели UNet [4], которая зарекомендовала себя в задачах классификации, сегментации и других областях.

IV. Заключение

В работе реализован сквозной цикл разработки системы бесконтактного мониторинга жизненно важных показателей на базе FMCW–радара, полностью интегрированный в математическую среду Engee с использованием методологии модельно-ориентированного проектирования. Ключевым элементом подхода стало создание детализированной модели в Engee. Методология модельно-ориентированного проектирования обеспечила сквозную имитацию всей системы, позволив верифицировать взаимодействие компонентов на этапе моделирования до физической реализации. Для решения сложной задачи выделения ЧСС и ЧД из зашумленных данных после предварительной обработки успешно применены глубокие нейронные сети. Они продемонстрировали высокую точность детектирования сердечного ритма даже в условиях его маскировки дыханием и шумами и адаптивность к вариабельности физиологических процессов. Таким образом, интеграция модельно-ориентированного проектирования и алгоритмов на основе глубоких нейронных сетей в среде Engee сформировала эффективный замкнутый цикл разработки, обеспечивающий точный и устойчивый мониторинг и ускоряющий процесс разработки.

Литература

[1] Модельно-ориентированное проектирование. Систематическое использование моделей во всех процессах разработки [Электронный ресурс] // Сайт компании Math-Works. – URL: *https://www.mathworks.com/solutions/model-based-design.html* (дата обращения: 01.06.2024).

[2] *Zakrzewski M., Singh A., Yavari E., Gao X., Boric-Lubecke O., Vanhala J., Palovuori K*. Quadrature Imbalance Compensation With Ellipse-Fitting Methods for Microwave Radar Physiological Sensing. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, No. 6, June 2014, pp. 1400–1410.

[3] Российская среда динамического моделирования Engee [Электронный ресурс] // Личный кабинет пользователя Engee. – URL: *https://www.engee.com* (дата обращения: 01.06.2025).

[4] *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. MICCAI 2015 – *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9351, pp. 234–241 (2015)

Зависимость мощности и сдвига центральной частоты спектра рассеяния Бриллюэна от изменения модуля Юнга

Э. В. Гармаева[1], Н. И. Горлов[2], Е. Т. Китова[3]

[1]Бурятский институт инфокоммуникаций (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Улан-Удэ, Россия,

[2]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия,

[3]Новосибирский Государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,

erzhena.garmaeva51@gmail.com, gorlovnik@yandex.ru, kitovaet@mail.ru

Аннотация. *Рассеяние Бриллюэна в оптических волокнах представляет собой широко используемое явление для распределённого измерения деформаций и температуры. Частотный сдвиг Бриллюэна и мощность рассеянного сигнала тесно связаны с акустическими свойствами волокна, которые, в свою очередь, определяются его упругими характеристиками. Одним из ключевых параметров оптического волокна является модуль Юнга, так как он напрямую влияет на скорость акустической волны, а значит, и на спектральные характеристики бриллюэновского рассеяния В докладе сформулированы актуальность и основные задачи исследования зависимости мощности и сдвига центральной частоты спектра рассеяния Бриллюэна от изменения модуля Юнга. Представлены основные математические соотношения. Разработан алгоритм и представлены результаты расчетов, которые могут быть применены при проектировании высокоточных волоконно-оптических датчиков. Сформулирована возможность вариации модуля Юнга путем изменения показателя преломления сердцевины волокна или его плотности во время производства оптоволоконного кабеля. Полученные результаты имеют важное значение для разработки сенсоров нового поколения, способных выявлять изменения в упругости материала или признаки усталости конструкции.*

I. Введение

Технологии распределённого волоконно-оптического зондирования (Distributed fiber-optic sensing - DFOS) стали мощным инструментом для мониторинга состояния конструкций, картирования температуры и измерения деформаций в строительстве, аэрокосмической и энергетической отраслях. Среди различных нелинейных эффектов, используемых в DFOS, рассеяние Бриллюэна имеет уникальное преимущество благодаря своей чувствительности как к механическим деформациям, так и к температуре, что позволяет осуществлять прецизионную диагностику на больших расстояниях по всей длине волокна.

Продукты обратного рассеяния Бриллюэна напрямую зависят от модуля Юнга оптического волокна. В системах волоконного зондирования на сдвиг центральной частоты спектра сигнала обратного рассеяния одновременно проявляются влияния температура и деформации. В этой связи являются весьма актуальными исследования влияния вариаций модуля Юнга сердцевины оптического волокна на мощность и сдвиг частоты Бриллюэна [1].

II. Теоретический анализ

Частотный сдвиг Бриллюэна $\Delta_{\nu B}_B$ в оптическом волокне - фундаментальный параметр в системах распределённого зондирования. Он определяется акусто - оптическим взаимодействием между падающим светом и термически индуцированными акустическими волнами, распространяющимися по сердцевине волокна. Это взаимодействие формирует частотно-смещённый обратный сигнал, характеристики которого зависят от оптических и механических

свойств среды. Центральным механическим параметром, влияющим на рассеяние Бриллюэна, является модуль Юнга E, который напрямую влияет на скорость акустической волны V_A.

Из континуумной механики известно, что скорость продольной акустической волны в однородном, изотропном материале определяется выражением:

$$v_a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{1}$$

где: E – модуль Юнга;

ρ – плотность материала.

Подставляя это в классическое выражение для сдвига частоты $\Delta\nu_B$

$$\Delta\nu_B = \frac{2n\nu_a}{\lambda}, \tag{2}$$

где: n –показатель преломления сердцевины волокна;

V_A – скорость продольной акустической волны;

λ – длина волны в вакууме,

получаем [1]:

$$\Delta\nu_B = \frac{2n}{\lambda}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3}$$

Эта зависимость означает, что любые изменения E, вызванные, например, механической нагрузкой, воздействием окружающей среды, термообработкой или длительным старением, будут выражаться в измеримом изменении $\Delta\nu_B$. Более того, поскольку рассеянная мощность P_B также зависит от акустического импеданса и ширины усиления, можно ожидать её чувствительность к изменениям E.

Несмотря на хорошо изученную зависимость $\Delta\nu_B$ от деформаций и температуры, явное влияние модуля Юнга как переменной до сих пор изучено недостаточно. В практических случаях, особенно при использовании композитных волокон или в условиях старения, значение E может меняться вдоль длины волокна. Если интерпретировать сдвиг Бриллюэна только через призму деформации или температуры, это может привести к систематическим ошибкам, если не учитывать влияние E.

В этой связи необходимо изолировать и количественно оценить влияние изменений модуля Юнга на спектр рассеяния Бриллюэна в стандартных одномодовых телекоммуникационных волокнах. При этом:

– установить аналитические зависимости между E, Δν_B и P_B;

– определить коэффициенты чувствительности:

$$\frac{d\Delta\nu_B}{dE}, \frac{dP_B}{dE}$$

Эти шаги необходимы для построения откалиброванной модели интерпретации DFOS-сигналов, учитывающей упругие свойства, и для создания нового подхода к распределённому мониторингу упругости.

Взяв производную по E, можно получить выражение для чувствительности частотного сдвига Бриллюэна к изменению модуля Юнга:

$$\frac{d\Delta\nu_B}{dE} = \frac{n}{\lambda}\cdot\frac{1}{\sqrt{E\rho}} \tag{4}$$

Это выражение демонстрирует нелинейную зависимость $\Delta\nu_B$ от E.

Мощность бриллюэновского рассеяния P_B описывается уравнением малого усиления [2]:

$$P_B(z) = P_0 \cdot exp[\, g_B \cdot P_p(z) \cdot L_{eff}], \tag{5}$$

где: P_0 – мощность зондирующего сигнала;

$P_p(z)$ – мощность сигнала накачки;

g_B – коэффициент усиления Бриллюэна;

L_{eff} – эффективная длина взаимодействия.

Коэффициент усиления Бриллюэна определяется выражением [3]:

$$g_B = \frac{n^7 p_{12}^2}{\lambda^2 \rho v_a \Gamma_B}, \tag{6}$$

где: p_{12} – фотоупругий коэффициент;

Γ_B – ширина линии рассеяния на уровне 0.5.

Подставляя формулу (1) в последнее выражение, получаем:

$$g_B \propto \frac{1}{\sqrt{E} \cdot \rho} \tag{7}$$

Следовательно, рассеянная мощность:

$$P_B \propto exp\left(\frac{C}{\sqrt{E}}\right), \tag{8}$$

где C – некоторая постоянная.

Это показывает, что даже умеренные изменения E могут заметно повлиять как на частоту, так и на интенсивность бриллюэновского сигнала.

Для оценки практического влияния изменений E на измерения рассеяния Бриллюэна ниже приводится сводка выражений:

– чувствительность частотного сдвига:

$$\frac{d\Delta\nu_B}{dE} = \frac{n}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{E\rho}} \left[\frac{\text{Гц}}{\text{Па}}\right] \tag{9}$$

– чувствительность усиления (качественно):

$$\frac{dg_B}{dE} \propto -\frac{1}{2} E^{-\frac{3}{2}} \tag{10}$$

III. Заключение

В проведенном исследовании метода распределенного зондирования оптического волокна, основанного на комбинированном эффекте рассеяния Бриллюэна и изменении модуля Юнга сердцевины волокна, были теоретически проанализированы взаимосвязи между параметрами спектра обратного рассеяния Бриллюэна и температурно-механическими воздействиями на оптическое волокно. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании высокоточных волоконно-оптических датчиков. При этом становится возможным вариации модуля Юнга сердцевины волокна путем изменения показателя преломления сердцевины волокна или его плотности во время производства оптоволоконного кабеля. Таким образом, чувствительность и рабочие характеристики оптоволоконных распределенных сенсорных систем могут быть значительно улучшены.

Литература

[1] *A. Gunday, S. E. Karlik, G. Yilmaz*, “International Review of Electrical Engineering (IREE)”, 8(2), 920 (2013).

[2] *M. Yasin, S. W. Harun, H. Ahmad, J. Optoelectron.* Adv. M. 13(8), 933 (2011).

[3] *A. Minardo, R. Bernini, L. Amato, L. Zeni, IEEE Sensors J.* 12(1), 145 (2012).

Математическая модель преобразователя частоты в нейронных ансамблях таламокортикальной системы мозга

М. В. Сысоева, А. А. Капустников, И. В. Сысоев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
sysoeva_mv@spbstu.ru

***Аннотация**. Принцип формирования дельта-ритма головного мозга в таламокортикальной системе до сих пор неизвестен, несмотря на большое количество различных гипотез. Основываясь на одной из гипотез, согласно которой таламокортикальная сеть рассматривается как единый колебательный комплекс, в данной работе предлагается модель, в которой дельта-ритм возникает в результате преобразования сетью внешнего высокочастотного сигнала. Этот сигнал играет роль кардиостимулятора и может локализоваться в пирамидных клетках коры головного мозга. В работе показывается, что таламокортикальная система может обладать свойством делителя частоты. Наши исследования также показывают, что генерация дельта-ритма в таламокортикальной системе может быть результатом преобразования системой внешнего сигнала, в первую очередь из-за архитектурных особенностей сети.*

I. Введение

Авторы данной статьи придерживаются идеи рассматривать интегральную таламокортикальную систему как сетевой преобразователь частоты. Где возбуждающие нейроны, в целом, играют роль проводников или усилителей входного сигнала, а тормозные нейроны – роль делителей частоты. Предполагается, что существует высокочастотный кортикальный генератор, который является внешним драйвером основного ритма для таламокортикальной сети, поскольку таламокортикальная система не восприимчива к сенсорным сигналам во время фазы сна. И появление дельта-ритма может быть результатом преобразования частоты этого типа управляющего сигнала. В работе продемонстрированы простые сетевые механизмы таламокортикальной системы, которые приводят к преобразованию внешней высокочастотной импульсной активности в низкочастотную импульсную (или взрывную) активность в дельта-диапазоне. Это относительно небольшой, но важный шаг в подтверждении гипотезы о том, что вся таламокортикальная система участвует в формировании активности в дельта-диапазоне.

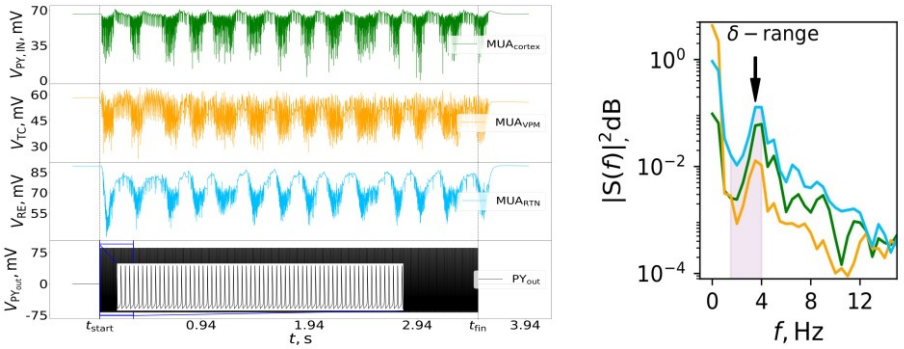
II. Модель

Считается [1], что для моделирования таламокортикальной сети мозга достаточно четырёх типов клеток: возбуждающие пирамидные нейроны (PY) и тормозные интернейроны (IN) коры, возбуждающие таламокортикальные нейроны (TC) и тормозные ретикулярные нейроны (RE) таламуса. Нейроны каждого типа строятся на основе модели Ходжкина-Хаксли [2], но с различными параметрами. Связь между нейронами осуществлялась за счёт глутаматергичесих (возбуждающих) и ГАМКергических (тормозных) синапсов. Параметры для всех используемых типов клеток и синапсов брались из работы [3]. Нейронный ансамбль состоял из 26 нейронов, матрица связности была взята из работы [4] и включала 8 пирамидных нейронов ($D_{PY} = 8$), 2 интернейрона ($D_{IN} = 2$), 8 таламокортикальных нейронов ($D_{TC} = 8$) и 8 ретикулярных нейронов ($D_{RE} = 8$). По отдельности нейроны всех типов находились в возбудимом неколебательном режиме. Чтобы поддерживать всю систему в возбудимом состоянии коэффициент связи k между различными типами нейронов подбирался отдельно, исходя из различных уровней возбуждения различным типов ячеек, и получился неодинаковым. Для того, чтобы вывести всю систему в колебательный режим, применялся высокочастотный внешний сигнал (около 201 Гц). Источником внешнего сигнала служил корковый пирамидный нейрон, находящий в колебательном режиме. Теоретически этот

стимул также должен быть результатом коллективной динамики какой-либо другой области или структуры мозга, но для упрощения моделирования мы использовали один нейрон. Внешний стимул всегда приходил на один из таламокортикальных нейронов. Длительность колебаний в сети полностью определялась длительностью этого внешнего сигнала, т.е. рассматривались вынужденные колебания.

III. Результаты

На рис. 1 показан пример колебаний, возникающих в таламокортикальной сети в ответ на внешний стимул. Предлагаемая сеть может рассматриваться как делитель частоты, в котором поступающая высокочастотная импульсная активность преобразуется в низкочастотную импульсную активность (2-4 Гц) таламокортикальной системы. Хотя низкопороговый кальциевый ток в RE-клетках и способствует возникновению низкочастотных колебаний, этого недостаточно для наблюдения дельта-ритма во всех областях таламокортикальной системы. Таким образом, возможность деления частоты является результатом организации сети. Из спектров колебаний сети можно сделать несколько выводов. Во-первых, в таком сложном сигнале ведущая частотная составляющая (за исключением более низкой частоты f<1 Гц) находится в дельта-диапазоне; таким образом, мы можем заключить, что мы действительно получили генератор дельта-ритма. Во-вторых, по-видимому, дельта-колебания имеют максимальную мощность в ретикулярном ядре таламуса, причем спектральный диапазон различим во всех трех рассматриваемых областях. В-третьих, TC-клетки играют большую роль в качестве проводников сигналов между корой головного мозга и ретикулярным ядром таламуса.



(а) (б)

Рис.1. Временные ряды (а) и спектры мощности (б) суммы потенциалов всех клеток определенной структуры мозга: кортикальные пирамиды и интернейроны вместе (кора головного мозга) - зеленый, таламокортикальные нейроны (вентропостериальное медиальное ядро таламуса) - оранжевый и ретикулярные нейроны (ретикулярное ядро таламуса) - светло-голубой. Серые пунктирные линии обозначают начало и конец внешнего воздействия. Черный график (нижний) показывает колебания внешнего нейрона коры головного мозга (поскольку эти колебания имеют очень высокую частоту, синяя квадратная область была увеличена, чтобы показать форму колебаний).

IV. Заключение

В данной работе были получены матрицы связанности таламокортикальной системы головного мозга, которые в ответ на внешний высокочастотный периодический сигнал переходят в вынужденный колебательный режим и работают как преобразователи частоты, выдающий на выходе колебания, лежащие в дельта-диапазоне. В работе демонстрируется необходимость учета целостной таламокортикальной системы (а не отдельных ее частей) при моделировании дельта-ритма. Также было высказано предположение о возможном существовании кортикального высокочастотного генератора, демонстрация методов получения такого генератора не была основной целью работы, но

это планируется в следующей работе, посвященной моделированию дельта-ритма таламокортикальной системы в виде переходных процессов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-25-00219.

Литература

[1] *P. Suffczynski, S. Kalitzin, F. L. Da Silva*, “Dynamics of non-convulsive epileptic phenomena modeled by a bistable neuronal network”, *Neuroscience*, 126(2), 2004, pp.467-484.

[2] *A. L. Hodgkin, A. F. Huxley*, “A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve”, *The Journal of Physiology*, 117(4), 1952, pp.500-544.

[3] *S. Ching, A. Cimenser, P. L. Purdon, E. N. Brown, N. J. Kopell*, “Thalamocortical model for a propofol-induced α-rhythm associated with loss of consciousness”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(52), 2010, pp.22665-22670.

[4] *Н. М. Егоров, В. И. Пономаренко, С. Н. Мельникова, И. В. Сысоев, М. В. Сысоева,* «Общность механизмов возникновения безаттракторных колебательных режимов в радиотехнических моделях таламокортикальной сети мозга», *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 2021, 29(6), с.927-942.

Двумерная теория акустооптической модуляции световых пучков на основе кристалла $NaBi(MoO_4)_2$

Г. В. Кулак[1], П. И. Ропот[2], Л. А. Тозик[1]

[1]Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, г. Мозырь, Республика Беларусь,

[2]Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,

g.kulak57@mail.ru, p.ropot@dragon.bas-net.by

Аннотация. *Исследована акустооптическая модуляция гауссовых световых пучков с длиной волны 1,06 мкм на продольных ультразвуковых волнах в кристаллах висмут натриевый двойной молибдат. С использованием двумерной теории связанных волн показано, что с увеличением длины акустооптического взаимодействия и мощности ультразвука эффективность дифракции увеличивается. Для центральной частоты ультразвука 56 МГц достигнута ширина полосы частотной перестройки модулятора ~ 55-58 МГц по уровню 3дБ.*

I. Введение

В работе [1] исследованы особенности брэгговской дифракции ограниченных световых пучков различных амплитудных распределений (гауссового, прямоугольного и лорентцевого) на ультразвуке (УЗ). Показано, что дифракционная эффективность уменьшается при переходе от пучка прямоугольного профиля, падающего на акустооптическую ячейку, далее переходя к гауссовому (ГП) и, наконец, к лорентцевому профилю.

II. Формулы и рисунки

На рис. 1 представлена схема изотропной брэгговской дифракции линейно поляризованных световых пучков.

а б

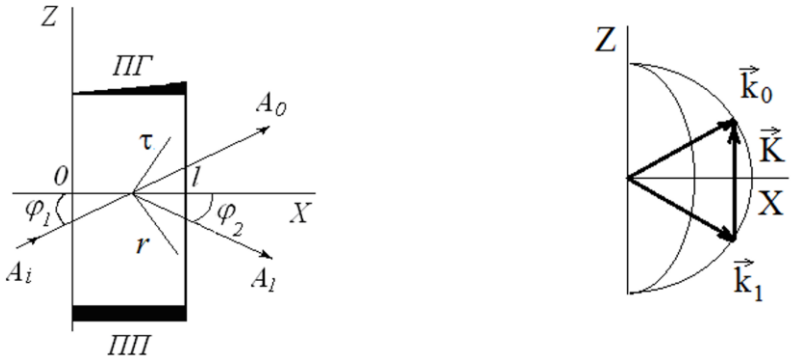


Рис. 1. а). Схема АО взаимодействия ГП и УЗ волны (ПП – пьезопреобразователь, ПГ – поглотитель ультразвука, φ_1 и φ_2 – угол падения и дифракции соответственно); б) геометрия расположения преломленной и дифрагированной плосковолновых компонент ГП в плоскости дифракции на продольной УЗ волне в кристалле $NaBi(MoO_4)_2$ ($\vec{K}$ – волновой вектор ультразвука, $\vec{k}_0$, $\vec{k}_1$ - волновые векторы преломленной и дифрагированной волн)

Рассмотрим геометрию АО взаимодействия (рис. 1), для которой УЗ волна распространяется в кристалле натрий висмут двойной молибдат ($NaBi(MoO_4)_2$) вдоль оси Z и занимает пространство между плоскостями $x = 0$ и $x = l$. Ось падающего ГП расположена в плоскости XZ под углом φ_1 к фронту УЗ волны. Сечение поверхности волновых векторов плоскостью дифракции XZ и

расположение плосковолновых компонент падающего ($\vec{k}_0$) и дифрагированного ($\vec{k}_1$) и плосковолновых компонент показано на рис.1б. При этом, как показано на рис. 1б, реализуется дифракционный процесс: $\vec{k}_0 + \vec{K} = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}$ ($\Delta\vec{k}$ - отстройка фазового синхронизма). Для рассматриваемой геометрии АО взаимодействия следует положить: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = \boldsymbol{arcsin(}\lambda_0\upsilon / 2n_o\upsilon\boldsymbol{)}$, где λ_0 – длина световой волны в вакууме, (n_o – обыкновенный показатели преломления кристалла), $\upsilon = \sqrt{c_{33}/\rho}$ - фазовая скорость продольной УЗ волны ($c_{33} = 78{,}6 \cdot 10^9\ Па$ - модуль упругости, $\rho = 5710\ кг/м^3$ - плотность кристалла [2]).

В рамках двумерной теории связанных волн система связанных дифференциальных уравнений для комплексных амплитуд дифрагированных волн $A_0(r)$, $A_1(\tau)$ имеет вид [1]:

$$\frac{\partial A_0}{\partial \tau} + ie^{i\Delta k(\tau+r)}\chi A_1 = 0, \frac{\partial A_1}{\partial r} + ie^{-i\Delta k(\tau+r)}\chi A_0 = 0, \quad (1)$$

где коэффициент связи дифрагированных волн χ выражается через свертки тензора диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon_{ij} = -\varepsilon_{ik}\varepsilon_{lj}p_{klmn}U_{mn}$ (ε_{ij}, U_{mn} - компоненты тензора диэлектрической проницаемости и тензора УЗ деформации) с векторами поляризации $\vec{e}_0, \vec{e}_1$ дифрагированных волн нулевого «0» и первого «1» порядка, то есть $\chi = k^2(\vec{e}_0\Delta\hat{\varepsilon}\vec{e}_1)/2$; $\tau = x\boldsymbol{sin}\varphi - z\boldsymbol{cos}\varphi$, $r = x\boldsymbol{sin}\varphi + z\boldsymbol{cos}\varphi$; $k = 2\pi n/\lambda_0$; $\Delta k = (\pi f_0\lambda_0 / n_o\upsilon^2)\Delta f$ – отстройка фазового синхронизма ($\Delta f = (f - f_0)$ – отстройка частоты УЗ от центральной f_0) [3]. Если искать решение системы уравнений (1) методом Римана с использованием граничных условий: $A_0(x=0) = A_{i0}$, $A_1(x=0) = 0$, то общее решение можно представить в виде:

$$A_0(r) = A_i(r) - \frac{1}{2}\nu\int_{-1}^{+1} A_i[r - g(1-q)]e^{-i\delta g(1-q)}\frac{J_1\left(\nu\sqrt{1-q^2}\right)}{\sqrt{1-q^2}}dq \quad (2)$$

$$A_1(\tau) = -i\frac{1}{2}\nu e^{-i2\delta\tau}\int_{-1}^{+1} A_i[g(1-q) - \tau]e^{-i\delta g(1-q)}J_0\left(\nu\sqrt{1-q^2}\right)dq \quad (3)$$

где $\nu = \chi l / kn^2\boldsymbol{cos}\varphi$ - индекс модуляции УЗ волной; $g = l\boldsymbol{sin}\varphi$ - геометрический параметр; $\delta = \Delta k / 2\boldsymbol{sin}\varphi$; $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода, соответственно нулевого и первого порядка. При этом индекс модуляции выражается через коэффициент (АО) качества M_2: $\nu = \frac{2\pi}{\lambda_0\boldsymbol{cos}\varphi}\sqrt{\frac{M_2P_al}{2h}}$, где P_a – мощность ультразвука, h – ширина пьезопреобразователя.

Выражения (2), (3) позволяют рассчитать амплитудное распределение дифрагированного пучка нулевого и первого порядка для любого уровня акустической мощности и широкого класса падающих световых пучков. Эффективность АО дифракции (η) определяется соотношением

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}|A_1(\tau)|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty}|A_0(r)|^2 dr + \int_{-\infty}^{+\infty}|A_1(\tau)|^2 d\tau} \quad (4)$$

Численные расчеты проводились для АО дифракции излучения с длиной волны λ_0=1,06 мкм на медленной сдвиговой УЗ волне, распространяющейся под малым углом $\varphi << 1$ к оси [100] кристалла $NaBi(MoO_4)_2$. Полагалось, что коэффициент АО качества для циркулярно-поляризованной

падающего волнового пучка равен [6]: M_2=92,3·10^{-18}с^3/г. В соответствии со схемой, представленной на рис.1а, гауссов световой пучок имеет вид

$$A_i(r) = exp[-(r/w)^2], \quad (5)$$

где w – радиус гауссового светового пучка.

На рис. 2 для гауссового светового пучка представлена зависимость дифракционной эффективности η от мощности ультразвука P_a, рассчитанная по формулам (2)-(5), при различных значениях длины АО взаимодействия l.

а б

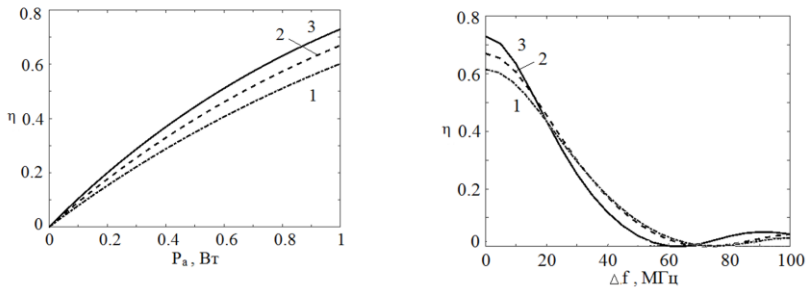


Рис. 2. Зависимость эффективности дифракции η ГП η от мощности ультразвуковой волны P_a (а) и отстройки частоты УЗ волны от брэгговской Δf (б) при различных длинах АО взаимодействия l: 1-3, 2-3,5, 3-4 мм (кристалл $NaBi(MoO_4)_2$, λ_0=1,06 мкм, n_o=2,303, n_e=2,131, M_2=92·10^{-18}с^3/г, h=6 мм, w= 3 мм, f_0=56 МГц)

При увеличении длины АО взаимодействия и мощности ультразвука максимум эффективности дифракции ГП увеличивается (рис.2а). Зависимость эффективности АО дифракции η падающего ГП от отстройки частоты УЗ волны от брэгговской (Δf) при различных длинах АО взаимодействия представлена на рис. 2б. Из рис. 2б следует, что при увеличении длины АО взаимодействия имеет место незначительное уменьшение ширины полосы пропускания АО модулятора по уровню 50% от максимального значения. Ширина полосы пропускания устройства составляет Δf≈58 МГц.

III. Заключение

Таким образом, теоретически исследованы особенности акустооптической модуляции света с длиной волны 1,06 мкм на продольной УЗ волне, распространяющейся вдоль оси [001] одноосного тетраглнального кристалла висмут натриевого двойного молибдата. Показано, что на длине акустооптического взаимодействия 4 мм, мощности ультразвука 1 Вт достижима эффективность дифракции 73%. Ширина полосы акустооптической модуляции при изотропной дифракции обыкновенных световых волн составляет ~ 55-58 МГц при увеличении длины акустооптического взаимодействия от 3 до 4 мм при акустической мощности 1 Вт. В кристаллах $NaBi(MoO_4)_2$ возможна акустооптическая модуляция излучения Nd:YAG лазера с длиной волны 1,06 мкм.

Литература

[1] *В.Н. Белый, И.Г. Войтенко, Г.В. Кулак*, «Дифракция световых пучков на затухающих ультразвуковых волнах в оптически изотропных средах», *Журнал прикладной спектроскопии*. **56(**5) 1992, с. 831-836.

[2] *Л.П. Авакянц, В.С. Бондаренко, Д.Ф. Киселев и др.* «Упругие и упругооптические свойства $NaBi(MoO_4)_2$», ФТТ. **28**(2).1986, с. 617-619.

[3] *В.И. Балакший, В.И. Парыгин, Л.Е. Чирков* Физическое основы акустооптики. Москва Радио и связь, 1985, 279 с.

Использование методов частотно-временного анализа для разметки тета- и дельта-ритмов в записях локальных потенциалов мозга

А. Ю. Долинина[1,2], М. В. Сысоева[1], Е. М. Сулейманова[3], И. В. Сысоев[1,2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,

[2]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия,

[3]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва, Россия,

dolinina13nastya@yandex.ru

***Аннотация**. В работе рассматривается применимость методов частотно-временного анализа для исследования электрической активности головного мозга, зарегистрированной у крыс в состоянии бодрствования и сна. В частности, внимание уделено тета- и дельта-ритмам, характеризующие данные состояния. Анализ проводился на основе фоновых двухсуточных записей локальных потенциалов, полученных от крыс линии Wistar с областей лобной коры и гиппокампа мозга с обоих полушарий. Для выделения ритмов использовался спектральный анализ с использованием оконного преобразования Фурье. На основе результатов анализа строились скелетоны в частотных диапазонах, характеризующих каждый из ритмов. Данные методы позволили изучить частотно-временную динамику сигналов локальных потенциалов в диапазонах частот каждого из ритмов. Полученные частотные характеристики позволили разметить участки с выраженными тета- и дельта-ритмами, а также выявить некоторые особенности частотной динамики каждого ритма.*

I. Введение

Электроэнцефалографическая активность (ЭЭГ), записанная как с поверхности коры головного мозга, так и из других областей мозга млекопитающего, широко используется для изучения работы головного мозга. В случае животных генетических моделей или фармакологических моделей также используются внутричерепные измерения локальных потенциалов мозга. Полученные измерения помогают в должной мере изучить особенности функционирования мозга как при патологическом состоянии, так и при состояниях без отклонений от нормы, таких как сон и бодрствование.

Данные электрической активности головного мозга указывают на общие черты между человеком и крысами. В частности, состояние бодрствования ассоциируется с высокочастотной активностью в ЭЭГ, тогда как периоды сна и состояния сонливости сопровождаются активностью медленных волн [1]. В данной работе будут рассмотрены тета- и дельта-диапазоны электрической активности головного мозга, как представители двух основных биологических состояний — бодрствования и сна. У грызунов тета-ритм проявляет себя в диапазоне частот 5-10 Гц с амплитудой 100-300мкВ во время активного и пассивного бодрствования, в том числе во время разнообразных движений, поведенческих реакций, а также в состоянии бездействия [2,3]. В свою очередь дельта-диапазон составляет 1-4 Гц с аналогичной амплитудой и становится заметным, когда более сложные нейронные системы отступают на второй план, а именно во время фазы глубокого сна [4].

В ходе данного исследования была проведена разметка экспериментальных сигналов локальных потенциалов мозга крыс моделей на сигналы с выраженным тета- и дельта-ритмами с использованием методов частотно-временного анализа.

II. Данные

В распоряжении имелись фоновые записи электроэнцефалограмм, полученные в рамках эксперимента по изучению влияния агониста каннабиноидных рецепторов на эпилептический статус

у крыс линии Wistar, разводимых в питомнике «Столбовая» [5]. Электрическая активность головного мозга регистрировалась у свободно передвигающихся животных с лобной коры и гиппокампа правого и левого полушарий. Каждая крыса наблюдалась в течение двух суток. Из общего числа животных были отобраны 14 ЭЭГ-записей, соответствующих требованиям по качеству сигнала и не содержащих артефактов, способных исказить вычисления. Для анализа выбирались временные отрезки, определенные на основе анализа поведения, длительностью от 30 минут до 1 часа. У каждой крысы были проанализированы пять таких фрагментов, разбитых на 10-секундные отрезки — как с коры, так и с гиппокампа с обоих полушарий.

III. Методы и результаты

Для разметки временного ряда применялся спектральный метод, отличающийся простотой и высокой информативностью. Его результатом является спектрограмма — график, отображающий, как изменяется спектральная плотность мощности сигнала во времени. Данный метод позволяет количественно определить вклад различных частотных диапазонов в общую мозговую активность. Для расчёта спектров использовалось оконное преобразование Фурье, при котором применялось окно Ханна длиной в 1 секунду. Окно скользило по сигналу с временным шагом $\Delta t = 1/258$ секунды, при этом обеспечивалось 99% перекрытие.

Для выявления частот с максимальной мощностью в заданных диапазонах на основе спектрограмм строились скелетоны — графики структур, отражающие, как изменяется доминирующая частота в пределах частотного диапазона с течением времени. В результате на данных структурах наблюдались многочисленные кратковременные скачки частот, вызванные как физиологической активностью, так и шумами. Чтобы избавиться от данных особенностей скелетоны подвергались фильтрации по времени: вся последовательность пар значений (длительность, частота) анализировалась, и если длительность частоты оказывалась меньше 0.1 секунды, то эта частота заменялась на предыдущую.

Анализ полученных спектрограмм и построенных скелетонов на основе сигналов гиппокампа показал, что тета-ритм достаточно явно себя проявляет в свойственном ему диапазоне частот 5-10 Гц. А именно изменение основной частоты в данном диапазоне варьируется в его пределах без резких и частых изменений. При этом было обращено внимание на наличие двух проявлений тета-ритма. Первый наблюдался в интервале частот 5-7 Гц и имел менее стабильную динамику основной частоты. Второй, наоборот, демонстрировал стабильную динамику ритма в интервале 8-10 Гц. Данную особенность почти невозможно отследить в изменении формы и структуры сигнала, но оказалось возможным при использовании данных методов, что позволило выделить временные интервалы с тета-ритмом.

В свою очередь анализ преобразований, полученных от сигналов лобной коры, показал менее однозначные результаты. В отличии от тета-ритма частотно-временная структура основной частоты в диапазоне 1-4 Гц имела нестабильный характер, но при этом сильно отличалась от временных интервалов сигнала, где преобладала хаотичная динамика. Зная особенности структуры сигнала дельта-ритма и опираясь на полученные результаты, была произведена разметка интервалов с данным ритмом.

IV. Заключение

Описанные методы позволили изучить частотно-временную динамику сигналов с таких областей головного мозга, как гиппокамп и лобная кора. Это в свою очередь позволило провести разметку тета- и дельта-ритмов. В результате исследования частотно-временной динамики сигналов с гиппокампа и лобной коры из данного набора для всех крыс было выявлено различное количество интервалов для каждой из крыс, где отчетливо проявлялись тета- и дельта- ритмы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №25-12-00176, https://rscf.ru/project/25-1200176/.

Литература

[1] *M. Waldhoer, S.E. Bartlett, J.L. Whistler*, “Opioid receptors”, *Annu Rev Biochem*. 73, 2004, pp. 953-990.

[2] *C.K. Young, N. McNaughton*, “Coupling of theta oscillations between anterior and posterior midline cortex and with the hippocampus in freely behaving rats”, *Cerebral Cortex*. 19(1), 2009, pp.24-40.

[3] *G. Buzsáki*, “Theta rhythm of navigation: link between path integration and landmark navigation, episodic and semantic memory”, *Hippocampus*. 15(7), 2005, pp. 827-840.

[4] *R. Stephenson*, “Automated analysis of sleep–wake state in rats”, *Journal of Neuroscience Methods*. 184(2), 2009, pp.263-274.

[5] *E.M. Suleymanova, V.A. Shangaraeva, C.M. van Rijn, L.V. Vinogradova*, “The cannabinoid receptor agonist WIN55. 212 reduces consequences of status epilepticus in rats”, *Neuroscience*. 334, 2016, pp. 191–200.

Применение импульсного вихретокового метода для определения электрической проводимости скрытых металлических объектов

Р. О. Белокопытов, В. П. Лунин, М. Е. Дёминова
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
BelokopytovRO@mpei.ru, LuninVP@mpei.ru, DiominovaM@mpei.ru

Аннотация. *В статье описано создание трёхмерной модели на основе метода конечных элементов, предназначенной для исследования импульсно-вихретокового метода обнаружения металлических объектов, скрытых внутри диэлектрических сред, таких как бетон. Основное внимание уделяется анализу отклика системы на наличие металлических включений с разной электропроводностью. В процессе численного моделирования изучается, как глубина залегания объектов и параметры возбуждающего импульса, в частности его скважность, влияют на форму измеряемого сигнала. Результаты показывают, что временной параметр — момент пересечения нуля напряжения на приёмной катушке — обладает большей устойчивостью к изменению зазора между преобразователем и объектом, чем амплитудный показатель. Это делает его более надёжным информативным признаком для оценки проводимости. Также установлено, что снижение скважности импульса повышает чувствительность метода к различиям в электропроводности исследуемых изделий.*

I. Введение

Обнаружение скрытых объектов представляет собой важную задачу в таких областях, как безопасность, археология, медицина и военное дело. Определение типа материала обнаруженного изделия имеет принципиальное значение: это позволяет не только повысить точность идентификации, но и предварительно оценить его потенциальную опасность, назначение или ценность. Одним из эффективных способов решения такой задачи является индукционный метод, лежащий в основе работы современных металлоискателей. Он основан на явлении электромагнитной индукции: возбуждающая катушка формирует переменное электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в проводящих объектах. Эти токи, в свою очередь, порождают вторичное поле, воспринимаемое измерительной катушкой и анализируемое для обнаружения металлических предметов. Однако, несмотря на высокую чувствительность, такие устройства зачастую не позволяют достоверно определить материал объекта.

Существенным шагом в развитии таких устройств стало использование импульсного возбуждения, обеспечивающего лучшую устойчивость к внешним помехам и более глубокое проникновение вихревых токов за счёт широкого спектра частот в возбуждающем сигнале [1, 2]. Цель статьи — исследовать возможность применения импульсного вихретокового метода для оценки электрической проводимости и, как следствие, определения типа материала скрытого металлического объекта.

II. Построение конечно-элементной модели

Для проведения опытов по определению проводимости металлических объектов была построена математическая модель накладного вихретокового преобразователя с импульсным возбуждением. При разработке модели была создана геометрия, состоящая из отдельных элементов, каждому из которых назначен соответствующий материал. К системе подключена электрическая цепь, обеспечивающая импульсное возбуждение. Также была выполнена настройка граничных условий и определены параметры катушек. Итоговая конструкция преобразователя включает возбуждающую и измерительные катушки, ферритовый магнитопровод и алюминиевую экранирующую оболочку (рис. 1) [3].

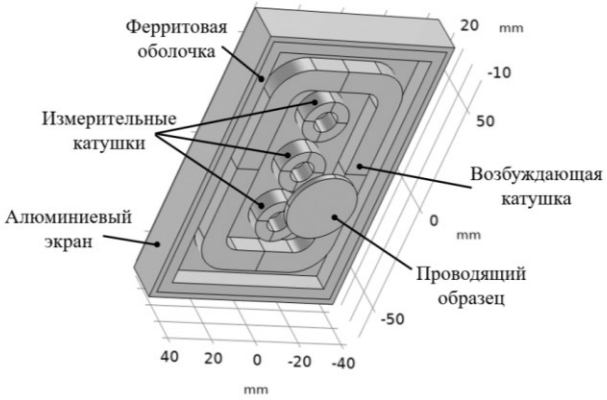
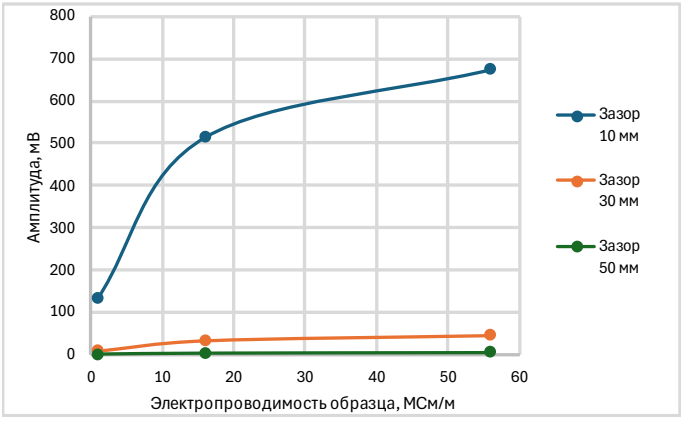


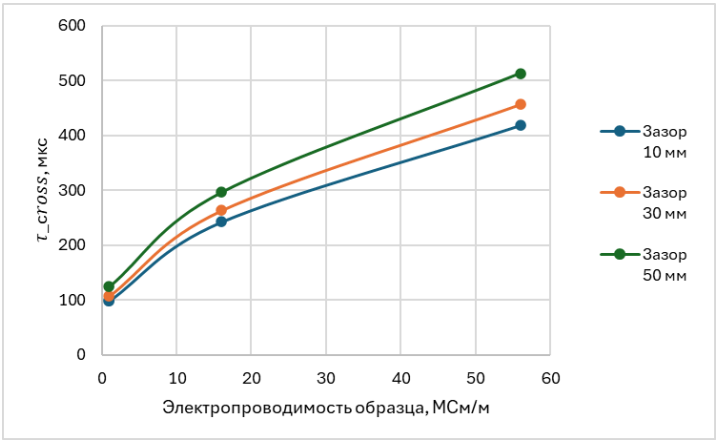
Рис. 1. Трёхмерная модель вихретокового преобразователя с образцом

III. Анализ результатов

В результате расчёта модели были получены зависимости амплитудных значений и значений времени пересечения нуля напряжения «разностных» сигналов на измерительных катушках от электрической проводимости металлического образца для зазоров величиной 10, 30 и 50 мм (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Зависимости: а) – амплитуды от электропроводимости, б) – времени пересечения нуля напряжения от электропроводимости

Графики показывают, что момент времени пересечения нуля обладает меньшей чувствительностью к изменению зазора между преобразователем и объектом, чем амплитуда

напряжения. Это делает время пересечения более надёжным информативным признаком для оценки значения проводимости.

Также было обнаружено, что уменьшение скважности возбуждающего сигнала ведет к росту времени пересечения нуля напряжения на измерительной катушке и увеличению чувствительности преобразователя к проводимости исследуемого объекта (рис. 3).

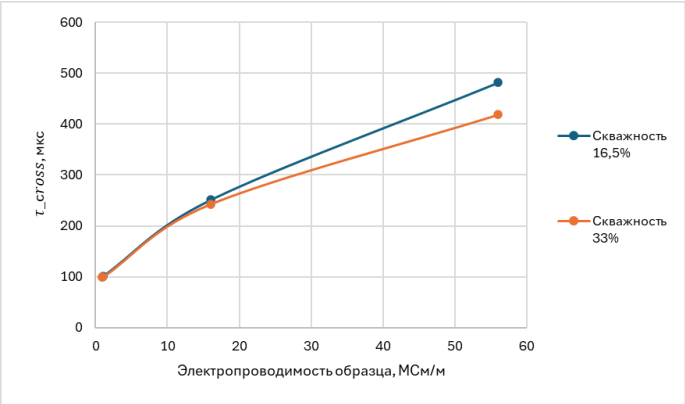


Рис. 3. Зависимость времени пересечения нуля от электропроводимости образца для различных скважностей

IV. Заключение

В ходе работы была построена конечно-элементная модель импульсно-вихретокового преобразователя, предназначенная для проведения опытов по определению электрической проводимости скрытых металлических объектов. Результаты исследования показывают, что момент времени пересечения нулевого уровня напряжения на измерительной катушке является надежным информативным признаком проводимости материала. Также значения данного параметра продемонстрировали слабую зависимость от изменения зазора между преобразователем и образцом.

Литература

[1] *Yang F., Li Z., Fu Y., Huang W., Tang C., Cao A*. Comparison of different types of focusing probes in pulsed eddy current testing // *AIP Advances*. — 2022. — Vol. 12. — P. 075010. — DOI: 10.1063/5.0090311.

[2] Eddy current metal detectors - pulse vs. CW // ResearchGate URL: *https://www.researchgate.net/publication/267987715* (дата обращения: 19.04.2025).

[3] Simulation of an ECT Sensor to Inspect the Reinforcement of Concrete Structures // ResearchGate URL: *https://www.researchgate.net/publication/289534447_Simulation_of_an_ECT_Sensor_to_Inspect_the_Reinforcement_of_Concrete_Structures* (дата обращения: 19.04.2025).

Количественная оценка параметров коррозии под изоляцией с помощью вихретокового преобразователя с П-образным сердечником

М. Е. Дёминова, В. П. Лунин, Р. О. Белокопытов
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
DiominovaM@mpei.ru, LuninVP@mpei.ru, BelokopytovRO@mpei.ru

Аннотация. *В работе рассматривается актуальная проблема нефтехимической промышленности — коррозия под изоляцией, представляющая серьезную угрозу для надежности и безопасности технологического оборудования. Предложен метод вихревых токов как эффективный способ неразрушающего контроля, позволяющий проводить диагностику без демонтажа теплоизоляционного слоя. На основе конечно-элементного моделирования разработан вихретоковый преобразователь с П-образным ферритовым сердечником и дифференциальной схемой измерения. Проведены численные эксперименты, позволившие выбрать наиболее подходящую частоту тока и установить зависимость характеристик дифференциального (разностного) сигнала (амплитуды и фазы) от геометрических параметров дефектов в контролируемом изделии. Построены калибровочные зависимости, обеспечивающие возможность количественной оценки глубины и диаметра.*

I. Введение

Коррозия под изоляцией (Corrosion Under Insulation, CUI) является одной из наиболее важных нерешенных проблем, стоящих сегодня перед нефтехимической промышленностью. Без должного внимания CUI может привести к критическому отказу компонентов, что приведет к нежелательной и дорогостоящей остановке технологического оборудования или даже в редких экстремальных случаях к нарушениям безопасности процесса [1], [2]. Однако обнаружение, количественная оценка и мониторинг CUI остаются сложной задачей. Метод «грубой силы», заключающийся в снятии изоляции с компонента для визуального или ультразвукового контроля, является непрактичным и дорогостоящим, особенно в тех случаях, когда изоляция содержит токсичный асбест.

Импульсный вихревой ток (Pulsed Eddy Currents, PEC) — это метод, который позволяет измерять толщину проводящего компонента через изоляцию и, следовательно, представляет собой основные преимущества для контроля CUI.

II. Построение конечно-элементной модели

На рисунке 1 представлена конструкция преобразователя, базирующегося на П-образном ферритовом сердечнике, который обеспечивает эффективное формирование и направление магнитного потока. На сердечнике размещены три катушки: одна возбуждающая и две измерительные, расположенные симметрично для обеспечения дифференциальных измерений. Принцип действия устройства основан на явлении электромагнитной индукции - переменный ток в возбуждающей катушке создает магнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в исследуемом объекте. При наличии дефектов в трубе, распределение вихревых токов нарушается, что фиксируется измерительными катушками. Объектом контроля в данной модели выступает участок трубы с искусственно созданным дефектом, где часть ферромагнитного материала заменена на воздушную прослойку. Такая имитация позволяет воспроизводить различные виды повреждений, встречающихся в реальных эксплуатационных условиях.

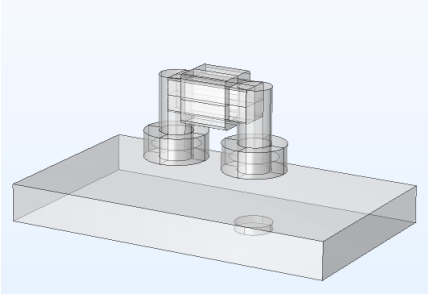


Рис. *1.* Трехмерная модель процедуры контроля ферромагнитного образца преобразователем с П-образным сердечником

III. Анализ результатов

Практическая значимость проводимого исследования заключается в разработке методики неразрушающего контроля, позволяющей не только детектировать наличие дефектов в ферромагнитных трубах, но и с достаточной для практики точностью определять их ключевые параметры: глубину, диаметр и локализацию (на внутренней или наружной стенке).

Для выбора информативных признаков на численной модели были исследованы изменяющиеся во времени разностные сигналы (“возмущения”, по отношению к сигналу без дефекта), вызванные изменением геометрических параметров дефекта-коррозии в форме диска различной толщины и диаметра. Например, при возбуждении пачкой из двух периодов гармонического сигнала в качестве информативных признаков выбраны амплитуда и фаза разностного сигнала (Рис.2).

Эти параметры обеспечивают комплексную характеристику дефектов, позволяя не только обнаруживать их наличие, но и определять геометрические особенности и локализацию. Для определения зоны наибольшей чувствительности сигнала к дефекту было смоделировано сканирование поверхности трубы с перемещением вихретокового преобразователя относительно дефекта. В результате было установлено, что максимальный отклик вихретокового преобразователя наблюдается в момент совпадения оси датчика с осью дефекта (Рис.3).

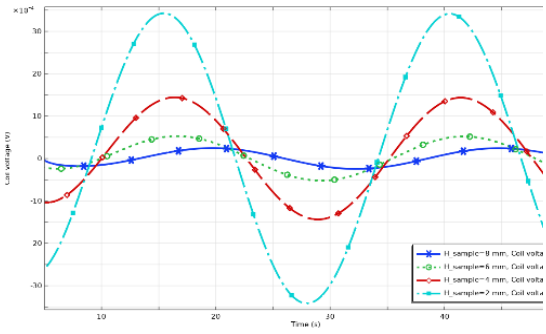


Рис. 2. Влияние толщины стенки трубы

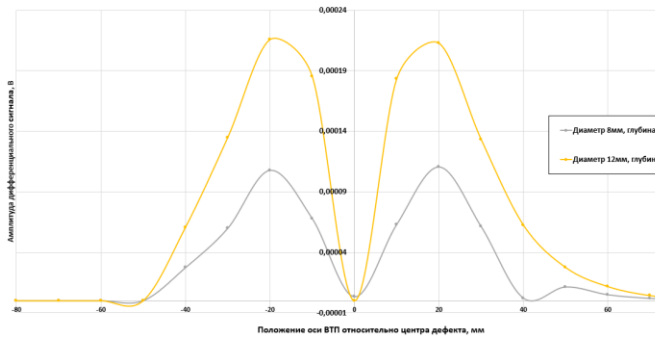


Рис. 3. Изменение дифференциального сигнала вдоль линии сканирования

В процессе исследований был построен ряд калибровочных характеристик, связывающих параметры дифференциального сигнала с геометрическими особенностями дефектов при условии точного совпадения оси дефекта с осью измерительной катушки. Результаты представляют собой серию зависимостей, позволяющих количественно оценивать параметры дефектов по характеристикам вихретокового сигнала.

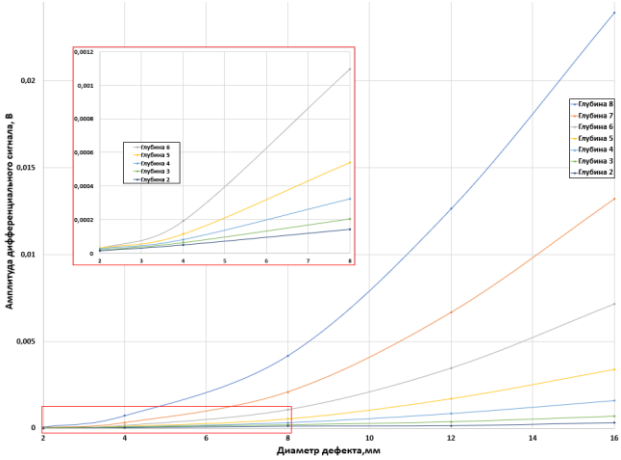


Рис. 4. Зависимость амплитуды дифференциального сигнала от диаметра дефекта

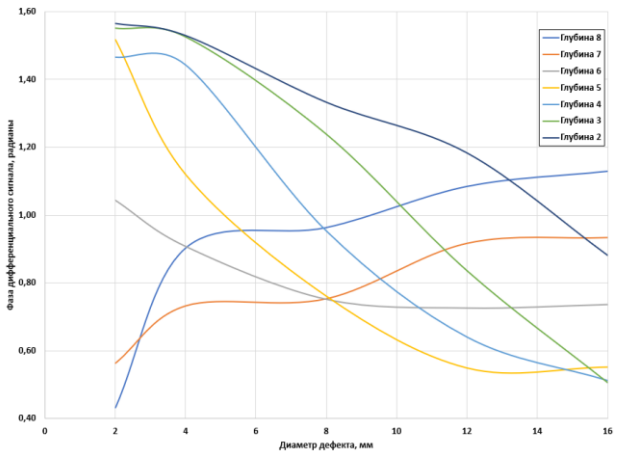


Рис. 5. Зависимость фазы дифференциального сигнала от диаметра дефекта

IV. Заключение

Разработанная конечно-элементная модель вихретокового преобразователя позволила детально воспроизвести физические процессы, происходящие при наличии дефектов, и выявить информативные признаки, наиболее чувствительные к изменениям геометрии повреждений. Полученные результаты показали, что методика позволяет не только надежно обнаруживать наличие дефектов, но и давать количественную оценку их глубины и диаметра.

Литература

[1] *Wilds N.* Corrosion under insulation // Trends in oil and gas corrosion research and technologies / ed. by A.M. El-Sherik. – *Woodhead Publishing*, 2017. – P. 409–429. – (Woodhead Publishing Series in Energy).

[2] *Jarvis R., Cawley P., Nagy P.B.* Current deflection NDE for the inspection and monitoring of pipes // *NDT & E International*. – 2016. – Vol. 81. – P. 46–59.

Математическая модель задачи транспортных перевозок

С. А. Волкова, К. А. Вытовтов
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
svolkovav2017@gmail.com

***Аннотация**. В статье рассматривается модель динамической «конкуренции» автомобильных перевозчиков. Модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений. Исследованы условия равновесия особых точек, приведены решения в виде предельных циклов и нерегулярных аттракторов. Установлена связь между типом особых точек и структурой элементарных нерегулярных аттракторов типа Ресслера, описана их типология.*

I. Введение

В последнее время остро стоит проблема оптимизация транспортных потоков в больших городах. Движение транспортных потоков и систему управления потоками изучают во многих работах [1].

Для исследования имеет значение представления о самоорганизации, диссипативных структурах, хаосе. Методы теории бифуркаций, нелинейных колебаний, асимптотического анализа широко применяются для исследования динамических процессов. Важным является определение точек бифуркации, исследование момента перехода от устойчивого состояния системы к хаотическому, не стабильному. Каскад бифуркаций на основе сценария Фейгенбаума и порядка Шарковского [2] получил развитие в виде гомоклинического каскада, разработанного Н. А. Магницким (сценарий ФШМ).

II. Логистическая система. Модель конкуренции

Анализ показал наличие в системе состояния равновесия (устойчивого и неустойчивого), предельные циклы и нерегулярные колебания (аттракторы).

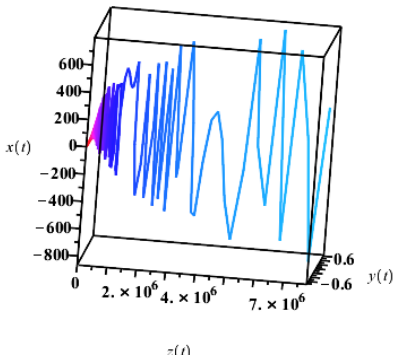


Рис.1. Хаотические движения

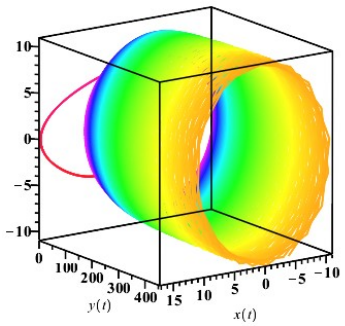


Рис.1. Квазипериодические движения

III. Заключение

В результате исследования получены разные типы движения, в зависимости от параметров системы.

Литература

[1] *Boisjoly G, El-Geneidy A*, Public transport equity outcomes through the lens of urban form, Editor(s): Corinne Mulley, John D. Nelson, *Urban Form and Accessibility*, Elsevier, Chapter 14, 2021, pp. 223-241.

[2] *А. Н. Шарковский,* Атракторы траекторий и их басейны, *Киев: Научная мысль*, 2013, p.320.

Микроволновый волноводный метод измерения физических свойств диэлектрической жидкости

А. С. Совлуков
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
sovlukov@yandex.ru

Аннотация. *Рассматриваются микроволновый метод измерения и устройство, применимые для определения физических свойств физических свойств (плотности, концентрации смесей, влагосодержания и др.) различных диэлектрических жидкостей. Устройство содержит волновод с размещенной в нем контролируемой жидкостью. Волновод выполнен в виде коаксиального волновода, а фиксированная частота генератора выбрана меньшей критической частоты волновода для одного из высших типов волн в нем, а именно для низшего типа волн H_{11} в коаксиальном волноводе. К волноводу на одном его торцевом участке через первый элемент связи подсоединен генератор электромагнитных колебаний фиксированной частоты, которая ниже критической частоты волновода, а на другом торцевом участке волновода к нему через второй элемент связи подключен детектор. К его выходу подсоединён регистратор амплитуды напряженности электрического поля. В другом варианте реализации устройства в электромагнитном поле волновода в одном из его торцевых участков размещена контролируемая жидкость и в другом торцевом участке волновода идентично размещена та же жидкость с эталонным значением ее измеряемого физического свойства.*

I. Введение

Рассматриваемый метод измерения может быть использован для высокоточного определения физических свойств (плотности, концентрации смесей, влагосодержания и др.) различных диэлектрических жидкостей. Известны методы и устройства для измерения физических свойств жидкостей, основанные на измерении их электрофизических параметров с применением радиочастотных и микроволновых резонаторов [1,2]. Их недостатком является ограниченная область применения, обусловленная невозможностью контроля малых изменений физических свойств жидкостей ввиду невысокой точности измерения соответствующих малых изменений информативных параметров. Для обеспечения возможности проведения таких измерений применяют двухканальные измерительные схемы с независимыми измерительным и эталонным каналами. В эталонном канале чувствительный элемент содержит жидкость с известными физическими свойствами [1].

Известен также метод измерения физических свойств жидкости, с применением волноводного резонатора с размещенным контролируемым объектом в электромагнитном поле одного из его торцевых участков и идентичным объектом с эталонным значением измеряемого физического свойства в электромагнитном поле другого торцевого участка [3]. Устройство имеет ограниченные функциональные возможности. Это обусловлено организацией резонатора на основе волновода при создании условий для отражения волн от его торцов и определении одной из характеристик стоячей волны в резонаторе. Устройство становится неработоспособным при отсутствии возможности образования стоячей волны.

II. Метод измерения

Рассматриваемый метод характеризуется достаточно простой конструкцией устройства для измерения физических свойств жидкости на его основе. Согласно методу измерения, производят возбуждение электромагнитных волн в коаксиальном волноводе на частоте f, которая ниже критической частоты $f_{кр}$ волновода для одного из высших типов волн в нем, а именно, низшего типа волн H_{11} в коаксиальном волноводе. При этом вдоль этого волновода существует только

ослабевающее реактивное поле, убывающее при удалении от возбуждающего элемента у одного из торцов волновода. Отметим, что устройство работоспособно именно на одном из высших типов волн в коаксиальном волноводе, так как волны в нём на основном типе *TEM* характеризуются отсутствием указанного распределения реактивного поля вдоль волновода.

Условием распространения волн по любому волноводу является выполнение неравенства: $f > f_{кр}$, которому должны удовлетворять частота f и критическая частота $f_{кр}$ для волны низшего типа, например, для волны H_{11} в круглом волноводе. При $f < f_{кр}$ имеет место режим, при котором распространения волн по волноводу не происходит, а существует только ослабевающее реактивное поле, убывающее при удалении от возбуждающего элемента. При этом электрическое поле E изменяется вдоль координаты z (оси волновода) по закону:

$$E = E_m e^{-\alpha z} \tag{1}$$

а постоянная ослабления α есть

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{c}\sqrt{f_{кр}^2 - f^2} \tag{2}$$

В этих формулах E_m – амплитуда напряженности электрического поля при $z = 0$; ε – диэлектрическая проницаемость вещества в волноводе, c – скорость света. Выбирая соотношение между f и $f_{кр}$, можно управлять значением α.

Так как существует зависимость α от диэлектрической проницаемости ε, являющейся функцией измеряемого физического свойства x, то устройство может быть построено на отрезке данного волновода. На рис. 1 изображен коаксиальный волновод 1, образованный совокупностью внутреннего проводника 2 и наружного проводника 3. Возбуждение волн в волноводе осуществляется с помощью генератора 4 через элемент связи 5. Другой элемент связи (приёма) 6 волн расположен на расстоянии l вдоль волновода 1. Принимаемые волны поступают на детектор 7, подсоединённый к регистратору 8.

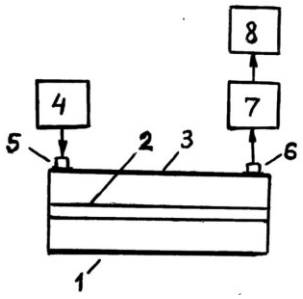


Рис. 1. Функциональная схема устройства для измерения физических свойств жидкости

Если частота f меньше $f_{кр}$, то амплитуда напряжённости $E(\varepsilon)$ электрического поля, являющаяся информативным параметром, в точке приёма есть

$$E(\varepsilon) = E_0 e^{-\alpha(\varepsilon) l} \tag{3}$$

где $\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{c}\sqrt{f_{кр}^2 - f^2} = k\sqrt{\varepsilon}$, $k = \frac{2\pi}{c}\sqrt{f_{кр}^2 - f^2}$ = const, E_0 – амплитуда напряжённости поля в области возбуждения электромагнитных волн в рассматриваемом волноводе (т.е. в области расположения связи 5), l – длина измерительного участка.

В коаксиальном волноводе среди возможных возбуждаемых волн типа H_{m1} (m = 1,2,3….) низший тип есть H_{11}. В этом случае имеем следующее выражение для $f_{кр}$ [4]:

$$f_{кр} = \frac{2c}{\pi(D_1 + D_2)}, \tag{4}$$

где D_1 и D_2 – значение, соответственно, диаметра внутреннего проводника 2 коаксиального волновода и внутреннего диаметра его наружного проводника 3.

Особенностью волн этих *H*-типов, характеризующихся произвольным первым индексом m = 1,2,3…, и вторым индексом 1, является наличие в формуле для $f_{кр}$ суммы диаметров D_1 и D_2.

Например, при D_1 = 10 мм, D_2 = 50 мм для волн типа H_{11} будем иметь $f_{кр}$ = 1,67 ГГц. При f = 1 ГГц будем иметь $k = \frac{2\pi}{c}\sqrt{f_{кр}^2 - f^2}$ = 0,2835 1/см. Следовательно, $E(\varepsilon)$ при l = 100 мм имеет величину $E(\varepsilon) = E_0 e^{-2,835\sqrt{\varepsilon}}$.

Длина l измерительного участка, частота f выбираются с учётом диаметров проводников коаксиального волновода, электрофизических параметров жидкости и диапазона их изменения. В устройстве [3], где рассматривается полый волновод с диаметром D_2, при тех же значениях диаметра D_2 = 50 мм и длины l = 100 мм будем иметь $f_{кр}$ = 3,6 ГГц. При f = 3,3 ГГц получаем k = 0,3012 1/см. При этом $E(\varepsilon)$ имеет величину $E(\varepsilon) = E_0 e^{-3,012\sqrt{\varepsilon}}$.

Следовательно, при реализации данного метода возможно, по сравнению с известным методом [3], при тех же габаритах (наружном диаметре волновода) и той же чувствительности реализующего метод устройства, применение более низкого значения f с обеспечением требуемого режима работы при $f < f_{кр}$. Это, в свою очередь, позволяет упростить конструкцию устройства, применяя элементную базу электронного блока устройства значительно более низких частот.

Возможна и следующая реализация устройства. В коаксиальном волноводе размещают контролируемую жидкость в электромагнитном поле одного из торцевых участков волновода и идентично размещают ту же жидкость с эталонным значением ее измеряемого физического свойства в электромагнитном поле другого торцевого участка волновода. В волноводе возбуждают волны на одном из его торцов. При этом частоту f выбирают ниже $f_{кр}$ для низшего типа волн H_{11}. Измеряют значение E на другом торце волновода, по которому судят об измеряемом физическом свойстве. При этом имеет место монотонность зависимости $E(\varepsilon)$ от значения ε, функционально связанного с измеряемым физическим свойством x: $\varepsilon = \varepsilon(x)$. Обе жидкости располагают в волноводе с разных его торцов идентично.

В данном устройстве в коаксиальном волноводе возбуждают волны на частоте f, меньшей $f_{кр}$. Значение E при удалении от элемента связи, служащего для возбуждения колебаний, спадает и зависит от физических свойств как эталонной, так и контролируемой жидкостей. У другого торца волновода принимаемый продетектированный сигнал поступает на регистратор для определения значения E.

III. Заключение

Данный метод реализуется достаточно просто с применением коаксиального волновода при возбуждении в нем электромагнитных волн фиксированной частоты. Он позволяет с высокой точностью измерять различные физические свойства диэлектрических жидкостей.

Литература

[1] *В.А.Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков.* Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука, 1978, 280 с.

[2] *В.А.Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989, 208 с.

[3] *А.С. Совлуков,* “Микроволновые волноводные методы измерений физических величин”, *Датчики и системы,* 2020, № 8, с. 35-43.

[4] *Г.А. Шаров.* Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств. М.: Горячая линия – Телеком, 2016, 472 с.

Information entropy of partially coherent light in a graded-index waveguide

N. I. Petrov
Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow, Russia,
petrovni@mail.ru

Abstract*. Variation of information entropy (IE) of partially coherent light during propagation in a graded-index waveguide is investigated using coherent states and mode decomposition methods. It is shown that the coherence radius can be determined from the uncertainty-type relation between beam width and angular spread.*

I. Introduction

The term entropy is widely used in various fields of science and technology. In statistical physics, it characterizes the probability of a certain macroscopic state of a system. Entropy also plays an important role in information transfer theory. It is known that entropy is a measure of the lack of information about a system. The concept of entropy associated with a partially coherent optical wave has attracted a lot of attention since the development of the theory of optical coherence [1]. In this case, the entropy is determined from the radiation coherence function [2, 3]. It reaches its minimum value in the case of coherent radiation and acquires a maximum value for incoherent radiation. Moreover, if the evolution of the coherence function in the medium is known, then the evolution of entropy can also be determined.

In this paper, the behavior of the information entropy of partially coherent Gaussian Schell-model (GSM) beam during propagation in a waveguide with a gradient profile of the refractive index is investigated.

II. Propagation of partially coherent GSM beam in a graded-index waveguide

The partially coherent light is described by the mutual coherence function $\Gamma(x, x', z)$, which describes the coherence properties between points x and x' at a distance z from the source plane. The complex degree of coherence is given by

$$\gamma(x, x', z) = \frac{\Gamma(x.x', z)}{\sqrt{\Gamma(x, x, z)\Gamma(x', x', z)}} \tag{1}$$

Below we consider the partially coherent GSM incident beam

$$\Gamma(x.x', 0) = I_0 exp\left\{-\frac{x^2 + x'^2}{a_0^2} - \frac{(x - x')^2}{r_0^2} - \frac{i\alpha_0}{2}(x'^2 - x^2)\right\}, \tag{2}$$

here a_0 is the beam width, r_0 is the coherence radius, and $\alpha_0 = k/R_f$, where $k = 2\pi/\lambda$ is the wavenumber, and R_f is the wavefront curvature radius.

Using modal decomposition, the coherence function (2) can be represented as

$$\hat{\Gamma}(x, x', 0) = \sum_m \lambda_m |\Phi_m(x)\rangle\langle\Phi_m(x')|, \tag{3}$$

where $\left|\Phi_p(x)\right\rangle = \left(\frac{2|c|}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2^p p!}} exp(-cx^2)\mathcal{H}_p(\sqrt{2|c|}x)$, are the Hermite-Gaussian modes, $c = c_r - ic_i$, $c_r = |c|(a + b)/\sqrt{(a + b)^2 + k^2/4R_f^2}$, $c_i = |c|\left(k/2R_f\right)/\sqrt{(a + b)^2 + k^2/4R_f^2}$, and $\lambda_p = I_0\sqrt{\frac{\pi}{b}}\left(\frac{2ab + k^2/4R_f^2}{2a(a+b+|c|)}\right)^{p+1/2}$, where $a = 1/a_0^2$, $b = 1/r_0^2$, $|c| = \left(\frac{1}{a_0^4} + \frac{2}{a_0^2 r_0^2} + \frac{k^2}{4R_f^2}\right)^{1/2}$.

Note that expansion (3) reduces to the expansion obtained in [4] for a plane wave ($R_f \to \infty$).

The information entropy of the GSM beam can be determined as [5-7]:

$$S = -\sum_m \lambda_m \ln \lambda_m , \quad (4)$$

where $\lambda_m = \frac{\langle m|\hat{\Gamma}|m\rangle}{Sp\hat{\Gamma}}$ is the probability of excitation of a given mode, i.e. the fraction of radiation energy carried by this mode.

In Fig. 1 the entropy as a function of the ratio of the radius of coherence to the radius of the incident beam is presented. It is seen that for a given beam width, the entropy decreases sharply with an increase of the radius of coherence.

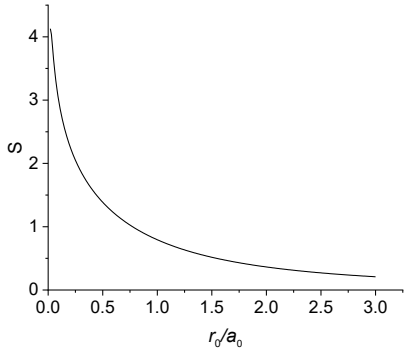


Fig.1. Dependence of entropy on the ratio of the coherence radius to the incident beam radius

The global coherence entropy depends only on the initial parameters of the beam, it does not depend on the parameters of the waveguide. The entropy reaches its minimum ($S = 0$) in the case of a totally coherent pure state (when $\lambda_0 = 1$ and $\lambda_{m>0} = 0$) and has a maximum ($S = \infty$) for incoherent radiation when all probabilities λ_m become equal.

The local coherence entropy is determined by the expression [5]

$$S_L = -Ln(1 - |\gamma^2(z)|) \quad (5)$$

In Fig. 2 the variation of the information entropy during propagation in a graded-index waveguide is shown.

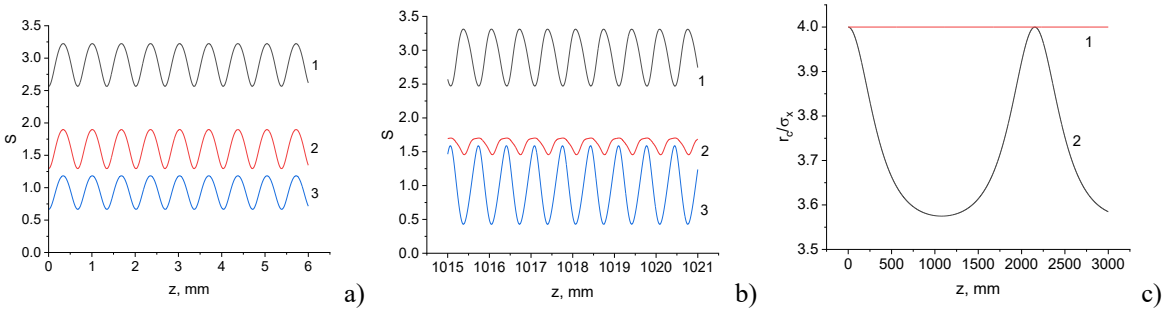


Fig.2. Information entropy and ratio r_c/σ_x as a function of propagation distance for different $s = x' - x$, 1 - s = 2 μm, 2 - s = 4 μm, 3 - s = 6 μm, $r_0 = 10$ μm, $a_0 = 5$ μm.
(a) paraxial approximation, (b) nonparaxial propagation, (c) r_c/σ_x, 1 – paraxial, 2- nonparaxial

It is seen that nonparaxiality significantly changes the periodic behavior of IE during paraxial propagation in a graded-index waveguide [8].

The radius of coherence can be expressed by the uncertainty-type relationship [3]:

$$\frac{1}{r_c^2(z)} = \frac{k^2\left(\sigma_x^2(z)\sigma_p^2(z) - \sigma_{xp}^2(z) - 1/4k^2\right)}{2\sigma_x^2(z)}, \quad (6)$$

where $\sigma_x^2 = \Delta x_\propto^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 = \frac{Sp\Gamma_0 x^2}{Sp\Gamma_0} - \left(\frac{Sp\Gamma_0 x}{Sp\Gamma_0}\right)^2$ defines the beam width, $\sigma_p^2 = \Delta p_\propto^2 = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2 = \frac{Sp\Gamma_0 p^2}{Sp\Gamma_0} - \left(\frac{Sp\Gamma_0 p}{Sp\Gamma_0}\right)^2$ is the angular spread, and $\sigma_{xp} = \frac{1}{2}\langle xp + px \rangle - \langle x \rangle \langle p \rangle = \frac{1}{2}\frac{Sp\Gamma_0 (xp+px)}{Sp\Gamma_0} - \frac{Sp\Gamma_0 x}{Sp\Gamma_0}\frac{Sp\Gamma_0 p}{Sp\Gamma_0}$ defines the wavefront curvature radius.

The generalized uncertainty relationship, which determines the coherence coefficient, can be introduced as:

$$C = k^2\left(\sigma_x^2(z)\sigma_p^2(z) - \sigma_{xp}^2(z) - 1/4k^2\right) = \frac{2\sigma_x^2(z)}{r_c^2(z)} \quad (7)$$

In the paraxial approximation, the relation $\frac{\sigma_x^2(z)}{r_c^2(z)} = const$ is fulfilled, i.e. the coherence coefficient $C = \sigma_x^2(z)\sigma_p^2(z) - \sigma_{xp}^2(z) = \sigma_x^2(0)\sigma_p^2(0) - \sigma_{xp}^2(0)$ is an invariant (Fig. 2c).

III. Conclusion

Thus, the nonparaxial evolution of the IE of a partially coherent GSM beam in a graded-index waveguide has been investigated. If the complex degree of coherence describes the local coherence of radiation, then entropy is a characteristic of global coherence. It is demonstrated that both the degree of coherence and the entropy can be determined based on measurements of the geometric characteristics of the beam. The results can be generalized to the case of Bessel-Gauss beams with orbital angular momentum [9-13].

The results obtained can be useful for optimizing optical systems, for example, to improve the efficiency of data transmission in optical communications and image quality in optical imaging systems, as well as to assess the security of encrypted information.

Acknowledgement

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State contract FFNS-2025-0007.

References

[1] *L. Mandel, E. Wolf*, "*Optical Coherence and Quantum Optics*", Cambridge University: Cambridge, MA, USA, 1995.

[2] *S.G. Krivoshlykov, N.I. Petrov and I.N. Sisakyan*, "Spatial coherence of optical fields in longitudinally inhomogeneous media with the square-law index profile", *Sov. J. Quantum Electron*. 15(3), 1985, pp. 330-338.

[3] *S.G. Krivoshlykov, N.I. Petrov, I.N. Sissakian*, "Density-matrix formalism for partially coherent optical fields propagating in slightly inhomogeneous media*", Opt. and Quant. Electr*. 18, 1986, pp. 253-264.

[4] *A. Starikov and E. Wolf*, "Coherent-mode representation of Gaussian Schell-model sources and of their radiation fields", *J. Opt. Soc. Am.* 72(7), 1982, pp. 923–928.

[5] *P. Refregier, J. Morio*, "Shannon entropy of partially polarized and partially coherent light with Gaussian fluctuations", *J. Opt. Soc. Am. A* 23, 2006, pp. 3036-3044.

[6] *P. Rüfrügier, F. Goudail, P. Chavel, A. Friberg*, "Entropy of partially polarized light and application to statistical processing techniques," *J. Opt. Soc. Am. A* 21(11), 2004, pp. 2124–2134.

[7] *Y. Chen, J. Wu, S. Lin, J. Yu, Y. Cai, and X. Zhu*, "Optical spatial coherence-induced changes of
Shannon entropy of a light beam in turbulence", *Opt. Exp*. 32, 2024, pp. 34086-34-094.

[8] *S.A. Wadood, K. Liang, G.P. Agrawal, T.D. Visser, C.R. Stroud, A.N. Vamivakas*, "Propagation of Gaussian Schell-model beams in modulated graded-index media", *Opt. Expr*. 29, 2021, 21240.

[9] *N.I. Petrov*, "Vector Laguerre–Gauss beams with polarization-orbital angular momentum entanglement in a graded-index medium", *J. Opt. Soc. Am. A* 33, 2016, pp. 1363-1369.

[10] *N.I. Petrov*, "Evolution of Berry's phase in a graded-index medium". *Phys. Lett. A*. 234, 1997, pp.239-250.

[11] *N.I. Petrov*, "Spin-orbit and tensor interactions of light in inhomogeneous isotropic media", *Phys. Rev. A*, 88, 2013, 023815.

[12] *N.I. Petrov*, "Depolarization of Light in Optical Fibers: Effects of Diffraction and Spin-Orbit Interaction", *Fibers* 9(6), 2021, 34.

[13] *N.I. Petrov*, "Sharp focusing of partially coherent Bessel-correlated beams by a graded-index lens", *Opt. Lett*. 48, 2023, 6048-6051.

Наблюдение фотонного спинового эффекта Холла в субволновых решетках: влияние материала и поляризации излучения

Н. И. Петров[1], Ю. М. Соколов[1], В. В. Стоякин[1],
В. А. Данилов[1], В. В. Попов[2], Б. А. Усиевич[3]
[1]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, г. Москва, Россия,
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
[3]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия,

***Аннотация**. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование фотонного спинового эффекта Холла (ФСЭХ) при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса в металлических субволновых дифракционных решетках из серебра и никеля. Продемонстрировано влияние материала решетки и состояния поляризации падающего лазерного излучения на угловой сдвиг отраженного пучка. Показано, что состояния поляризации падающего излучения, при которых наблюдается ФСЭХ в никелевых и серебряных решетках, существенно различаются.*

I. Введение

При отражении или преломлении пучка света на границе раздела двух сред происходят пространственные и угловые сдвиги в зависимости от его поляризации. Как отраженный, так и преломленный пучки образуются в результате интерференции волн, переизлученных в соседних средах. Исследования показывают много интересных явлений, включая хорошо известные спин-независимые сдвиги Гуса-Хенкен (ГХ) и спин-зависимые сдвиги Имберта-Федорова (ИФ) в плоскости и вне плоскости распространения падающего пучка, соответственно [1 - 3]. Значительное увеличение сдвига ГХ достигается возбуждением поверхностных плазмонных волн [4, 5] и блоховских поверхностных электромагнитных волн в фотонных кристаллах [6]. Заметное увеличение углового смещения можно наблюдать для сильно сфокусированного пучка, отраженного диэлектрической поверхностью, вблизи угла Брюстера [7]. В [8] показано смещение центра тяжести сагиттальных лучей, распространяющихся в градиентном световоде. Физическая причина продольного сдвига ГХ заключается в угловой дисперсии коэффициентов отражения Френеля. Сдвиг ИФ - спин-зависимый эффект, возникающий в результате спин-орбитального взаимодействия [9]. В [10], используя поляриметрические и оптимизированные методы слабых измерений (weak measurements), продемонстрирован усиленный поверхностным плазмонным резонансом ФСЭХ, проявляющийся в пространственном (угловом) расщеплении циркулярно-поляризованных фотонов с противоположными знаками спиральности (спина) при отражении лазерного пучка от поверхности никелевой решетки. Теоретически и экспериментально продемонстрировано, что угловой сдвиг может быть изменен со спин-независимого (сдвиг Гуса-Хенкен) на спин-зависимый (ФСЭХ) при изменении состояния поляризации падающего пучка.

В настоящей работе мы исследуем влияние состояния поляризации и угла падения пучка света на сдвиг ИФ при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в субволновой дифракционной решетке из серебра.

II. ФСЭХ в субволновых дифракционных решетках

Угловой спектр пучка, отраженного от поверхности решетки, может быть представлен в виде [10]:

$$\begin{bmatrix} E_{rw}^{p} \\ E_{rw}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p cos\gamma + \dfrac{k_{ry}(r_p + r_s)cot\theta_i sin\gamma}{k_0} \\ r_s sin\gamma - \dfrac{k_{ry}(r_p + r_s)cot\theta_i cos\gamma}{k_0} \end{bmatrix} \tilde{E}_i(k_{ix}, k_{iy}), \quad (1)$$

где r_p и r_s - коэффициенты отражения для пучков с p- и s- поляризациями, соответственно, γ – угол между направлением линейной поляризации падающего пучка по отношению к горизонтальной плоскости, $k_{ix} = k_0 sin\theta_i$ – волновой вектор, θ_i – угол падения пучка лазерного излучения.

На рис. 1 представлены схема экспериментальной установки, изображение решетки, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), и схематическое изображение ФСЭХ. В экспериментах использовались дифракционные никелевые решетки с периодом Λ = 400 нм и глубиной h = 80 нм и серебряные решетки с глубиной 20 нм. Падающее излучение с длиной волны λ = 632.8 нм линейно поляризовано. ППР в никелевой решетке наблюдается при угле падения пучка 33.53°. Для серебряной (Ag) решетки с периодом 400 нм ППР наблюдается при угле падения пучка 33.30°.

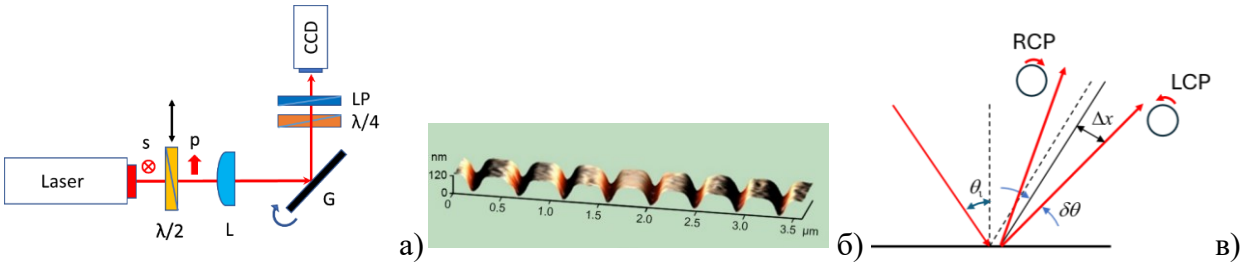


Fig.1. (а) Схема экспериментальной установки, (б) АСМ изображение решетки, (в) схематические изображение продольного ФСЭХ

При пропускании отраженного пучка через фильтр определенной циркулярной поляризации одно из пятен исчезает. Это означает, что при отражении пучка происходит угловое разделение лево- и право- поляризованных фотонов. Левое и правое пятна поляризованы по кругу с противоположными знаками спиральности. Физический механизм такого разделения обусловлен спин-орбитальным взаимодействием, усиленным поверхностным плазмонным резонансом в субволновой дифракционной решетке. Расчеты, проведенные с использованием стандартной теории [9], показали хорошее согласие с измерениями. На рис. 2 представлены измеренные и расчетные профили интенсивностей отраженного пучка на расстоянии z = 22 см от поверхности серебряной решетки с периодом 400 нм и глубиной 20 нм. Видно, что положения измеренных пиков интенсивности хорошо согласуются с результатами моделирования.

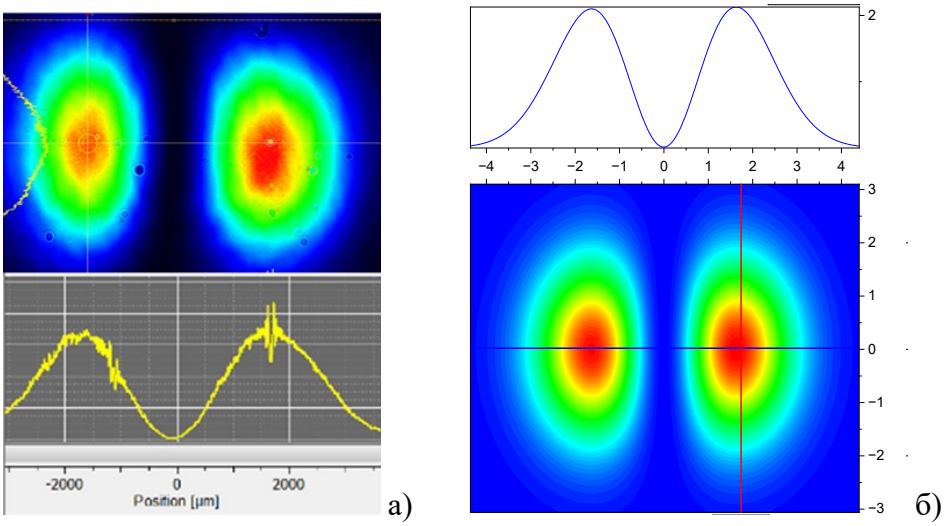


Рис. 2. Профили интенсивностей отраженного пучка от поверхности серебряной (Ag) решетки. Эксперимент (а) и расчет (б). z = 22 см, $\theta_i = \theta_{res} = 33.30°$

Отметим, что пространственное разделение лево- и право- циркулярно-поляризованных пучков света, отраженных от серебряной решетки, больше, чем от никелевой. Оптимальный угол поляризации γ, при котором наблюдается максимальный ФСЭХ, для никелевой решетки составляет 4°. Отметим, что в отличие от никелевой решетки, для серебряной решетки оптимальный угол поляризации составляет 40°. Такое различие обусловлено влиянием диэлектрической проницаемости материала.

III. Заключение

Таким образом, изменение угла падения и состояния поляризации лазерного пучка являются эффективными способами управления спиновым расщеплением (пространственным разделением лево- и право- циркулярно-поляризованных пучков света), особенно для увеличения его величины или изменения пространственного положения отраженного пучка. Для никелевой и серебряной субволновых решеток были продемонстрированы чрезвычайно большие угловые сдвиги. Высокая степень разделения по спинам (95%) достигается при оптимальном состоянии поляризации падающего пучка и резонансном угле падения. Поляриметрические измерения показали, что мощность отраженного пучка при ППР перераспределяется в разные поляризационные состояния. Кроме того, вблизи резонансного угла падения происходит значительная деполяризация света, вызванная ППР. Будущие исследования могут быть связаны с использованием векторных пучков света. Особый интерес представляет рассмотрение структурированных световых пучков с орбитальным угловым моментом [11, 12].

Полученные результаты могут быть полезны в прецизионных измерениях, спектроскопии, спин-селективных нанофотонных системах, при разработке оптических сенсоров и нанофотонных устройств, таких как светоделители и оптические переключатели, а также в угловой метрологии и квантовой обработке информации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2025-0007.

Литература

[1] *F. Goos and H. Hanchen*, “Ein newer und fundamentaler Versuch zur Total reflexion”, *Annalen der Physik* 436, 1947, pp.333-346.

[2] *F. I. Fedorov*, “К теории полного отражения”, *Доклады Акад наук СССР* 105, 1955, сс.465-468.

[3] *C. Imbert*, “Calculation and experimental proof of the transverse shift induced by total internal reflection of a circularly polarized light beam”, *Phys. Rev*. D 5, 1972, pp.787–796.

[4] *N.I. Petrov, Danilov, V.V. Popov, and B.A. Usievich*, “Large positive and negative Goos-Hänchen shifts near the surface plasmon resonance in subwavelength grating“, *Opt. Express* 28, 2020, pp. 7552-7564.

[5] *N.I. Petrov, Y.M. Sokolov, V.V. Stoiakin, V.A. Danilov, V.V. Popov, B.A. Usievich*, “Observation of Giant Angular Goos-Hanchen Shifts Enhanced by Surface Plasmon Resonance in Subwavelength Grating”, *Photonics* 10, 2023, 180.

[6] *I.V. Soboleva, V.V. Moskalenko, and A.A. Fedyanin*, “Giant Goos-Hanchen effect and Fano resonance at photonic crystal surfaces”, Phys. Rev. Lett. 108, 2012, 123901.

[7] *N.I. Petrov*, ”Reflection and transmission of strongly focused light beams at a dielectric interface”, *J. Mod. Opt*. 52, 2005, pp.1545-1556.

[8] *N.I. Petrov*, “Beam shift in a graded-index optical fiber”, *J. Opt*. 15, 2013, 014011.

[9] *K. Y. Bliokh and A. Aiello*, “Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov beam shifts: an overview”, *J. Opt.* 15, 2013, 014001.

[10] *N.I. Petrov, Yu.M. Sokolov, V.V. Stoiakin, V.A. Danilov, V.V. Popov, B.A. Usievich*, “Direct observation of the enhanced photonic spin Hall effect in a subwavelength grating”, *Opt. Lett.* 50, 2025, pp. 1317-1320.

[11] *N.I. Petrov*, “Depolarization of Light in Optical Fibers: Effects of Diffraction and Spin-Orbit Interaction”, *Fibers* 9, 2021, 34.

[12] *N.I. Petrov*, “Depolarization of Vector Light Beams on Propagation in Free Space”, *Photonics* 9, 2022, 162.

Оптимальное управление IT-проектом с использованием нейро-нечетких моделей

О. М. Проталинский, А. А. Ханова, Р. С. Гаврилов
Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,
protalinskiy@gmail.com, akhanova@mail.ru, ruslangavrilov2001@mail.ru

***Аннотация**. В статье рассматриваются методы к управлению IT-проектами на основе формализации оптимизационной модели, учитывающей ключевые ограничения: затраты, сроки и качество выполнения. Описаны количественные модели продуктивности и контроля исполнения, позволяющие оценивать эффективность работы команды и корректировать загрузку ресурсов. Введена целевая функция затрат, минимизация которой обеспечивает выбор наиболее эффективной конфигурации ресурсов при заданных ограничениях. Особое внимание уделено параметру качества, включённому в модель как жесткое ограничение, нарушение которого может привести к провалу проекта. Для учета высокой неопределенности и сложности взаимосвязей между параметрами предлагается использование интеллектуальных методов, в частности адаптивно нейро-нечетких систем вывода (ANFIS). Представленный метод ориентирован на повышение устойчивости управленческих решений и эффективности реализации сложных и динамичных IT-проектов.*

I. Введение

В условиях стремительного развития информационных технологий программные решения все больше приобретают ключевое значение в деятельности современных организаций. В сфере информационных технологий IT-проекты характеризуются высокой степенью сложности, динамичностью, а также необходимостью гибкого подхода на изменения требований [1]. Возникает необходимость в гибких и адаптивных подходах, способных обеспечить баланс между несколькими важными факторами: соблюдением сроков, минимизацией затрат и обеспечением требуемого уровня качества проекта.

Ключевая задача современного управления IT-проектами заключается в поиске оптимального распределения ресурсов, которое минимизирует общие издержки при выполнении проекта, не выходя за рамки установленных ограничений. При этом качество IT-проекта становится не просто целевой метрикой, но и жестким ограничением, нарушение которого может привести к недостижению бизнес-целей проекта или полной его несостоятельности. Современные методы управления IT-проектами требуют не только формализации всех этапов, но и активного применения аналитических, математических и интеллектуальных инструментов, позволяющих формировать эффективные решения в условиях многокритериальности и неопределенности.

II. Методы и модели управления

Для комплексной оценки состоянии и прогнозирования выполнения проекта используются следующие модели:

Модель продуктивности $P = W / T$, где P – продуктивность распределенной работы, W – объем выполненной работы, T – затраченное время. Данная модель позволяет сравнить эффективность команд и корректировать загрузку ресурсов.

Модель контроля исполнения $E = W_{\text{факт}} / W_{\text{план}}$, отражает отклонение от плана и может использоваться для пересмотра сроков и перераспределения ресурсов.

III. Формализация оптимизационной модели

IT-проект представляет конечную последовательность взаимосвязанных задач, направленных на создание уникального продукта в сфере информационных технологий. Управление IT-проектом рассматривается, как управляемая система, которая включает этапы планирования, исполнения,

контроля и завершения. На каждом этапе необходимы оценка сроков, контроль отклонений и управление рисками.

Целью исследования выступает минимизация затрат при соблюдении ограничений по срокам и качеству. Оптимизационная цель формализуется через функцию затрат, которую необходимо минимизировать: $Z = \sum_{i=1}^{n}(C_i \cdot T_i) + O_f + O_v)$, где C_i – ставка i – го участника, T_i – его трудозатраты, O_f – фиксированные офисные расходы, O_v – переменные расходы. В оптимизационной задаче функция затрат выступает критерием оптимальности, где минимальное значение Z соответствует наиболее эффективному варианту реализации проекта. Данная цель достигается при соблюдении ограничений, среди которых наибольшее значение имеет требуемое качество, выполняемого IT-проекта: $Q \geq Q_{min}$. Качество выполнения IT-проекта Q должно соответствовать минимально допустимому уровню Q_{min}, ниже которого результат считается неудовлетворительным. Здесь Q – интегральный показатель качество выполнения проекта, Q_{min} – минимально допустимый уровень качества, определяемый на основе опыта, применяемых методов управления и организационной работы. В силу высокой неопределенности и нелинейных взаимосвязей, классические модели управления не позволяют полноценно оценить данные параметры. Для формализации ограничения по качеству целесообразным считается интеграция методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности адаптивно нейро-нечетких систем вывода (ANFIS) [2]. Преимущества использования нейросетей и нечеткой логики в ANFIS-сетях является потенциально эффективным инструментом для моделирования сложных зависимостей, плохо поддающихся аналитическому описанию. В контексте рассматриваемой оптимизационной задачи входные вектор x состоит из факторов, влияющих на качество: $x = \{Q_i,\ K_c, M, R_p\}$ (входной вектор модели качества), где x – входной вектор модели качества, Q_i – уровень квалификации участников, K_c – коэффициент коммуникации, M – тип методологии, R_p – степень формализации процессов

Таким образом, ограничение при $Q \geq Q_{min}$ переходит из строго аналитической формы в гибкую интеллектуальную модель, способную адаптироваться под особенности конкретного проекта. $Q = ANFIS(x)$, где $ANFIS$ – обученная нейро-нечеткая система, способная аппроксимировать выходные значения на основе набора обучающих правил и функций принадлежности.

$$\begin{cases} minC = C_d + C_i + C_m \\ Treal = f(N, Q_i, W) \leq T_{max} \\ ANFIS\left(Q_i, E, K_c, Z, M, R_p\right) \geq Q_{min} \end{cases}$$

IV. Заключение

Представленный подход к управлению IT-проектами основан на интеграции математической модели оптимизации с использованием методов искусственного интеллекта, таких как ANFIS. Это позволяет одновременно учитывать затраты, сроки и качество, обеспечивая выполнение ключевых проектных ограничений. Применение многоуровневой системы моделей и интеллектуальных методов управления делает возможным принятие обоснованных решений даже в условиях высокой неопределённости и быстро меняющихся требований. Включение качества в качестве жёсткого ограничения меняет саму стратегию оптимизации: акцент смещается с минимизации затрат на обеспечение стабильного и предсказуемого результата. Предлагаемый подход особенно актуален для управления сложными и динамичными IT-проектами, где традиционные методы оказываются недостаточными.

Литература

[1] *Брукс Ф.* Мифический человеко-месяц. 2-е изд. / пер. с англ. — 1979.

[2] *Arora M., Raj R., Jaiswal A., Singh R., Singh R., Nain A., Srivastava A., Kumar S., Chopra S.* An ANFIS-driven estimation of effort in Agile Scrum projects // 2024.

Использование нейросети для стабилизации углового положения ИСЗ

К. А. Орехов, В. Ю. Сахаров, А. А. Тихонов
Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
st024389@spbu.ru, v.sakharov@spbu.ru, a.tikhonov@spbu.ru

***Аннотация**. В работе рассматривается искусственный спутник Земли (ИСЗ), движущийся по кеплеровой круговой орбите произвольного наклонения. Для стабилизации углового положения ИСЗ в орбитальной системе координат используется электродинамическая система, опирающаяся на одновременное использование двух управляющих моментов – лоренцева момента и момента магнитного взаимодействия. Решается задача стабилизации ИСЗ в прямом положении равновесия с учетом влияния возмущающего воздействия гравитационного момента. Решение производится в два этапа. На первом этапе с помощью метода Монте-Карло подбираются коэффициенты усиления, входящие в выражения для управляющих моментов, а на втором этапе происходит обучение нейросети на базе ранее найденных управлений. Произведено сравнение найденных управлений с аналогичными управлениями, ранее построенными аналитически. Показана эффективность предложенного подхода. Продемонстрирована сходимость процесса управления к программному движению при любых случайно задаваемых начальных условиях из широкого диапазона.*

I. Введение

С развитием научного направления под названием «Машинное обучение и Искусственный Интеллект (ИИ)» появился запрос на решение фундаментальных и практических задач с использованием ИИ, как инструмента, который никак не умаляет практической важности аналитических и численных методов исследования, а, наоборот, подкрепляет и ускоряет процессы реализации тех или иных решений, подходов, методов анализа априорных и апостериорных данных, с которыми сталкиваются исследователи, в том числе, в области динамики космических аппаратов [1]. В данной работе рассматривается задача о стабилизации углового движения ИСЗ на базе нейросетевого подхода. В процессе решения данной задачи была использована распространённая архитектура полносвязной нейросети и метод обучения её на базе ранее найденных управлений.

II. Постановка задачи

Рассматривается ИСЗ, движущийся по кеплеровой круговой орбите произвольного наклонения в гравитационном и магнитном полях Земли. Решается задача стабилизации такого движения ИСЗ относительно центра масс, называемого далее программным движением, при котором система главных центральных осей инерции ИСЗ $Cxyz$ совпадает с орбитальной системой координат $C\xi\eta\zeta$ с ортами $\vec{\xi}_0, \vec{\eta}_0, \vec{\zeta}_0$. В программном движении кватернион ориентации ИСЗ $\Lambda = (\lambda_0\,, \lambda_1\,, \lambda_2\,, \lambda_3\,)^T$ принимает значение $\Lambda = (\pm 1, 0, 0, 0)^T$, а угловая скорость $\vec{\omega}'$ ИСЗ относительно системы $C\xi\eta\zeta$ равна нулю. Поскольку орбитальная система координат вращается относительно инерциальной системы координат с угловой скоростью $\omega_0\vec{\eta}_0$, то абсолютная угловая скорость ИСЗ $\vec{\omega}$ в программном движении принимает значение $\vec{\omega} = \omega_0\vec{\eta}_0$. С учетом обозначения $\vec{\Omega} = \vec{\omega}/\omega_0$ программное движение принимает вид

$$\lambda_0 = \pm 1,\ \ \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,\ \ \ \Omega_y = 1,\ \ \Omega_x = \Omega_z = 0 \qquad (1)$$

Для описания движения ИСЗ используется нормальная система семи дифференциальных уравнений относительно семи фазовых переменных: $\lambda_0,\ \lambda_1,\ \lambda_2,\ \lambda_3\ ,\ \Omega_x,\ \Omega_y,\ \Omega_z$. Независимой переменной является безразмерное приведённое время $u = \omega_0 t$.

Электродинамическая система управления угловым движением ИСЗ [2] предполагает одновременное использование двух управляющих моментов – лоренцева момента $\vec{M}_L = \vec{P} \times \vec{T}$ и

момента магнитного взаимодействия $\vec{M}_M = \vec{I} \times \vec{B}$, где $\vec{B}$ – вектор индукции геомагнитного поля, $\vec{T} = \vec{v}_C \times \vec{B}$, $\vec{v}_C$ – скорость центра масс ИСЗ относительно гринвичской системы координат, $\vec{P} = Q \cdot \overrightarrow{CO}$, причем Q – электростатический заряд ИСЗ, O – центр заряда ИСЗ, $\vec{I}$ – собственный магнитный момент ИСЗ. Управляемый вектор $\vec{P}$ зависит от двух скалярных коэффициентов k_L и h_L. Аналогично, управляемый вектор $\vec{I}$ зависит от двух скалярных коэффициентов k_M и h_M, подбираемых на этапе синтеза управления. Эти коэффициенты могут выбираться постоянными [2] – в этом случае они просто равны k_{L0}, h_{L0}, k_{M0}, h_{M0} – или переменными. Так, в работе [3] они выбирались в виде $k_L = \frac{k_{L0}}{Q|\vec{T}|^2}$, $h_L = \frac{h_{L0}}{Q|\vec{T}|^2}$, $k_M = \frac{k_{M0}}{|\vec{B}|^2}$, $h_M = \frac{h_{M0}}{|\vec{B}|^2}$.

Целью стабилизации ИСЗ является достижение программного движения (1) при достаточно произвольных начальных условиях:

$$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1, \ -1.5 \le \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z \le 1.5 \qquad (2)$$

III. Результаты компьютерного моделирования

Предварительные численные эксперименты показали, что если коэффициенты k_{L0}, k_{M0}, h_{L0}, h_{M0} выбирать хаотично, то при разных начальных условиях из множества (2) ИСЗ будет стабилизироваться в одном из движений: $\lambda_0 = \pm 1$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$, $\Omega_y = \pm 1$, $\Omega_x = \Omega_z = 0$.

Предложенный в [2] выбор коэффициентов управления постоянными $k_{L0} = 0.0025$, $k_{M0} = 0.002$, $h_{L0} = 0.2$, $h_{M0} = 1.0$, как показали численные эксперименты, однозначно решает задачу стабилизации ИСЗ в программном движении (1).

В настоящем исследовании использован метод Монте-Карло для выбора коэффициентов управления из промежутков: $k_{L0} \in (0.0; 0.005)$, $k_{M0} \in (0.0; 0.003)$, $h_{L0} \in (0.0; 0.7)$, $h_{M0} \in (0.2; 1.2)$. На каждом шаге решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта 4-го порядка случайным образом выбиралось большое количество (в данной работе бралось 626) упорядоченных четвёрок $(k_{L0}, k_{M0}, h_{L0}, h_{M0})$. После чего виртуально совершался шаг метода Рунге-Кутта и выбиралась та четвёрка, которая приводила к наименьшему значению выбранной нормы

$$N = \sqrt{(|\lambda_0| - 1)^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 + 0.000001\left(\Omega_x^2 + \left(\Omega_y - 1\right)^2 + \Omega_z^2\right)} \qquad (3)$$

Предложенная методика позволяла выбирать такую последовательность четвёрок из коэффициентов управления, чтобы при произвольных начальных условиях (иногда после значительного количества шагов метода Рунге-Кутта) выбранная норма оказывалась меньше 0.001, что по мнению авторов соответствовало стабилизации ИСЗ при требуемом положении равновесия системы дифференциальных уравнений.

В дальнейшем метод Монте-Карло использовался в качестве учителя для нейронной сети, которая весьма быстро (за несколько итераций) смогла обучиться и тоже выбирала такую последовательность четвёрок коэффициентов управления, чтобы при произвольных начальных условиях решение системы дифференциальных уравнений стабилизировалось в требуемой точке. Для численных экспериментов авторы использовали полносвязную трёхслойную сеть с 256 нейронами в обоих скрытых слоях, функцией активации гиперболический тангенс и методом оптимизации Adam [4], сконструированную в языке программирования Python с помощью библиотеки PyTorch. На вход нейронной сети подавалось 9 вещественных чисел: 7 из них – это упомянутые неизвестные функции в системе дифференциальных уравнений, $\sin u$, $\cos u$ (поскольку сама переменная u без вхождения в тригонометрическую функцию в дифференциальных уравнениях отсутствует). Выход нейронной сети состоял из 4 вещественных чисел из промежутка $(-1; 1)$, из которых с помощью линейного преобразования получались коэффициенты k_{L0}, k_{M0}, h_{L0}, h_{M0}, лежащие в установленных диапазонах. Преимущество нейронной сети по сравнению с методом Монте-Карло заключается в скорости работы (мгновенно по сравнению с несколькими минутами). Также следует отметить, что нейронная сеть превзошла своего учителя: добиться того, чтобы метод

Монте-Карло приблизил норму N к нулю менее чем на 0.001 удавалось далеко не всегда, а нейронная сеть, обобщив информацию, находила коэффициенты управления, приводящие к тому, что норма N оказывалась менее 1e-8. На графиках показаны зависимости «самолётных» углов ориентации ИСЗ от приведённого времени u при следующем варианте начальных условий $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.5$, $\Omega_x = \Omega_y = \Omega_z = -1.0$.

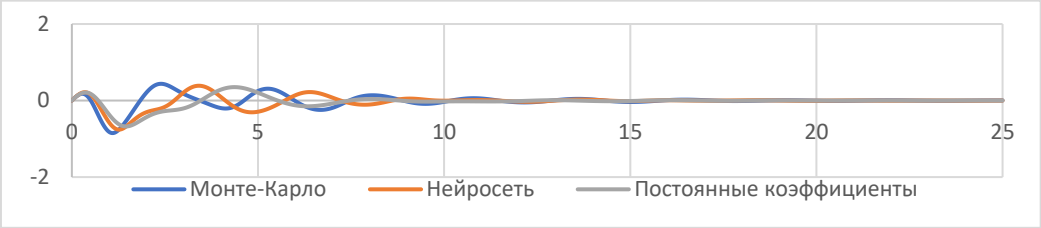


Рис.1. Зависимость крена от приведённого времени u

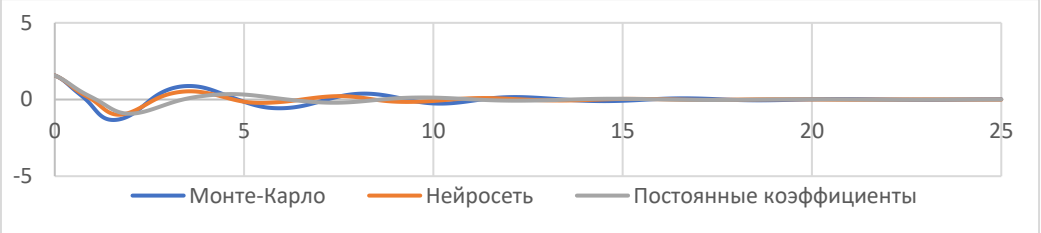


Рис.2. Зависимость рыскания от приведённого времени u

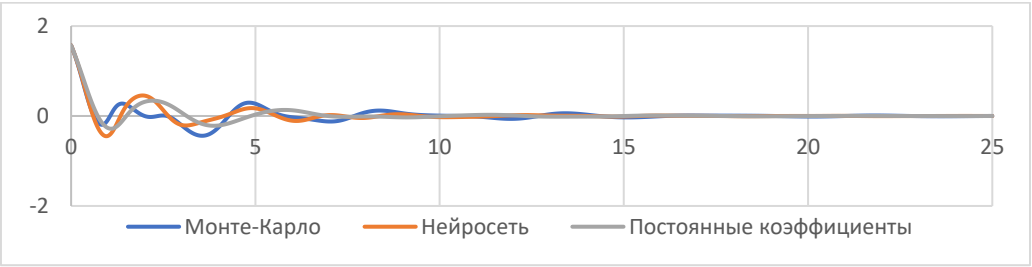


Рис.3. Зависимость тангажа от приведённого времени u

IV. Заключение

Изучены два работоспособных метода (Монте-Карло и использование нейронной сети) для управления ИСЗ с целю его стабилизации в желаемом положении.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-41-02031, https://rscf.ru/project/24-41-02031/

Литература

[1] *M. Shirobokov, S. Trofimov, M. Ovchinnikov*, “Survey of machine learning techniques in spacecraft control design”, *Acta Astronautica*, 186, 2021, pp. 87-97. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.05.018.

[2] *К.А. Антипов, А.А. Тихонов*, “Электродинамическое управление в задаче о стабилизации космического аппарата в геомагнитном поле”, *Космические Исследования*, 52(6), 2014, С. 512-520.

[3] *A.Y. Aleksandrov, A.A. Tikhonov*, “Asymptotic stability of a satellite with electrodynamic attitude control in the orbital frame”, *Acta Astronautica*, 139, 2017, pp. 122-129. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.06.033.

[4] *D.P. Kingma, J.L. Ba,* “Adam: a method for stochastic optimization”, *Published as a conference paper at ICLR 2015*, arXiv:1412.6980v9.

Нейросетевое обнаружение ключевых точек для автоматизации контроля качества на производстве

Г. А. Альгашев, И. А. Лёзин
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва,
г. Самара, Россия,
algashev.ga@ssau.ru

***Аннотация**. В данной работе предложена и исследована методика автоматизированного обнаружения ключевых точек промышленных деталей на основе комбинации синтетической генерации данных и глубоких свёрточных нейросетевых моделей. Для формирования обучающего набора использован VTK-рендеринг эталонных 3D-моделей, в том числе элементов конструктора LEGO, с реалистичным моделированием освещения, теней и частичной окклюзии. Обучение моделей YOLO11n-pose, HRNet-Pose и Stacked Hourglass Network проводилось на объединённом наборе данных, а их тестирование выполнялось на отдельной выборке из 1000 изображений LEGO, не перекрывающихся с обучающими. Результаты показали, что HRNet-Pose достигает наивысшей точности PCK 93 %, тогда как YOLO11n-pose демонстрирует минимальную задержку 6 мс, а Stacked Hourglass Network сочетает приемлемую точность и скорость. Предложенный подход доказал свою способность к адаптивному распознаванию ключевых точек в условиях изменяющегося освещения, шума и частичной окклюзии, что делает его перспективным для внедрения в производственные процессы автоматизированного контроля качества.*

I. Введение

В современных условиях промышленного производства обеспечение стабильного качества продукции является одной из ключевых задач, напрямую влияющих на конкурентоспособность предприятия и безопасность потребителей. Традиционные методы визуального контроля, основанные на участии оператора, нередко оказываются медленными и подверженными субъективным ошибкам. В связи с этим автоматизация проверки изделий с помощью компьютерного зрения приобретает особую актуальность, поскольку сочетает высокую скорость обработки и постоянную точность при повторяющихся операциях [1].

Одним из важнейших этапов в системах автоматического контроля качества становится локализация семантически значимых точек на поверхности изделия. По положению этих ориентиров оцениваются геометрические параметры, выявляются деформации и дефекты. В реальных условиях детали часто оказываются частично перекрытыми, затемнёнными или расположены под произвольным углом к камере. В таких ситуациях классические методы, основанные на жёстких шаблонах [2] и пороговых фильтрах [3], теряют эффективность: неполный обзор и меняющиеся условия освещения приводят к ошибкам в детекции.

Нейросетевые подходы, напротив, способны учитывать широкий набор факторов, формирующих внешний вид изделия, и выделять стабильные признаки даже при частичной видимости [4]. Обученные на комбинации синтетических и реальных изображений, они адаптивно распознают ключевые точки на деталях сложной конфигурации, компенсируя изменения текстуры, оттенков и освещения. Это позволяет создавать устойчивые системы, способные не только фиксировать наличие дефекта, но и обеспечивать точную оценку геометрических характеристик.

В данной работе предложена методика, объединяющая синтетическую генерацию фотореалистичных изображений и нейросетевой модуль детекции ключевых точек, адаптированный к условиям неполного обзора.

II. Методика синтетической генерации данных на основе VTK-рендеринга 3D-моделей

Подход к синтетической генерации данных в этой работе основан на использовании библиотеки VTK для фотореалистичного рендеринга эталонных 3D-моделей деталей [5]. Каждая CAD-модель загружается в среду VTK, где ей придаются физически корректные свойства материала: отражение, преломление и взаимодействие с источниками света. Камера виртуальной сцены настраивается таким образом, чтобы создавать изображения под разными углами обзора, при этом варьируются параметры освещения: направление, интенсивность и цветовая температура. Благодаря этому обеспечивается естественное отображение бликов и теней на металлических и пластиковых поверхностях, максимально приближенное к реальным условиям производства.

Особое внимание уделяется моделированию частичной окклюзии: в сцены добавляются виртуальные заслоны – элементы конвейера, инструменты или другие компоненты, которые могут перекрывать ключевые области детали. При рендеринге автоматически вычисляются двумерные координаты ориентирующих точек на основе точной геометрии 3D-модели, что исключает необходимость ручной аннотации. Таким образом формируется одновременно изображение и разметка: проекции ключевых точек и ограничивающие рамки, необходимые для обучения нейросетей.

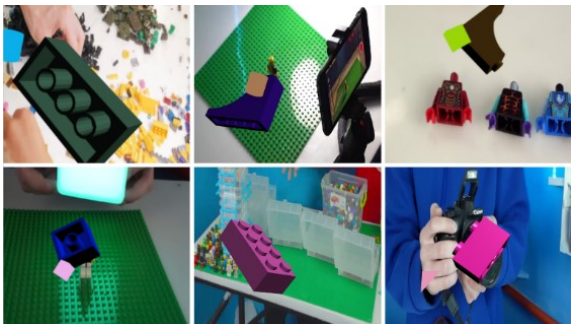


Рис. 1. Пример синтетических изображений для обучения

III. Обучение и оценка эффективности свёрточных моделей для обнаружения ключевых точек

В данном разделе описан процесс обучения трёх моделей, использованных в работе для обнаружения ключевых точек: YOLO11n-pose [6], HRNet-Pose [7] и Stacked Hourglass Network [8]. Обучение каждой модели проводилось на объединённом датасете, включающем как синтетические изображения, сгенерированные с помощью VTK-рендеринга, так и реальные снимки деталей.

Для обучения и оценки моделей был сформирован объединённый датасет, состоящий из 8000 синтетических изображений и 2500 реальных снимков деталей конструктора LEGO. Для тестирования моделей была выделена отдельная выборка из 1000 изображений LEGO.

Из приведённых результатов видно, что HRNet-Pose обеспечивает наименьшую среднеквадратичную ошибку и наибольший процент правильно локализованных ключевых точек. Однако скорость её работы 14,2 мс на изображение уступает показателю YOLO11n-pose, которое, в свою очередь, демонстрирует высокую скорость инференса при чуть меньшей точности PCK = 89,8 %. Stacked Hourglass Network занимает промежуточное положение: по точности она близка к HRNet-Pose, но уступает ей в быстродействии.

Таблица 1. Результаты обучения моделей для обнаружения ключевых точек

Модель	MSE (пиксели)	PCK@10 % (%)	Время инференса (мс)
YOLO11n-pose	2,12	89,8	6,0
HRNet-Pose	1,65	93,1	14,2
Stacked Hourglass Network	1,78	91,7	19,5

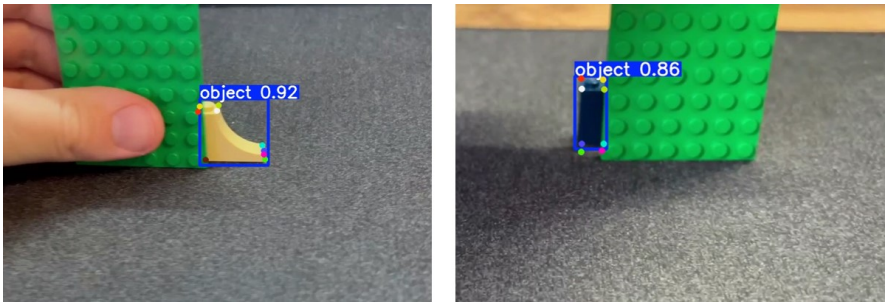


Рис. 2. Демонстрация обнаружения ключевых точек моделью YOLO11n-pose

IV. Заключение

В ходе исследования разработана методика автоматизированного обнаружения ключевых точек промышленных деталей, сочетающая синтетическую генерацию данных с помощью VTK и обучение свёрточных нейросетей. С помощью VTK были получены фотореалистичные изображения, учитывающие вариации углов обзора, освещения и частичную окклюзию, что позволило значительно снизить объём ручной разметки и получить разнообразный тренировочный датасет. Модели YOLO11n-pose, HRNet-Pose и Stacked Hourglass Network, обученные на комбинации синтетических и реальных изображений, продемонстрировали высокую точность локализации PCK до 93 % и скорость инференса 5–20 мс, достаточную для интеграции в производственную линию.

Анализ показал, что HRNet-Pose обеспечивает максимальную точность, а YOLO11n-pose – наименьшую задержку при более скромных вычислительных затратах. Stacked Hourglass Network представляет себе компромисс между этими показателями.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FSSS-2023-0006.

Литература

[1] *Ткаченко А.А., Петров В.С.* Применение методов компьютерного зрения для автоматизации контроля качества в промышленности // Автоматизация и современные технологии. 2021. № 5. С. 34–42.

[2] *Иванов Д.И., Смирнова Л.К.* Алгоритмы пороговой обработки изображений для детекции структурных элементов // Цифровая обработка сигналов. 2020. Т. 12. № 3. С. 56–65.

[3] *Кузнецов М.А.* Шаблонное сопоставление в задачах машинного зрения // Инженерный вестник. 2019. № 7. С. 22–30.

[4] *Redmon J., Farhadi A.* YOLOv3: An Incremental Improvement // arXiv. 2018. arXiv:1804.02767. URL: https://arxiv.org/abs/1804.02767.

[5] *Schroeder W., Martin K., Lorensen B.* The Visualization Toolkit (VTK): Open-source software for 3D graphics and visualization // Journal of Open Source Software. 2019. Vol. 4. № 38. P. 1452.

[6] *Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y.M.* YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors // arXiv. 2022. arXiv:2207.02696. URL: https://arxiv.org/abs/2207.02696.

[7] *Sun K., Xiao B., Liu D., Wang J.* Deep High-Resolution Representation Learning for Human Pose Estimation // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. P. 5693–5703.

[8] *Newell A., Yang K., Deng J.* Stacked Hourglass Networks for Human Pose Estimation // *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2016. P. 483–499.

[9] *Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y.* OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2021. Vol. 43. № 1. P. 172–186.

Нейросетевая диагностика технического состояния теплоэнергетического оборудования на основе эксплуатационных параметров

О. М. Проталинский, А. В. Андрюшин, Ю. Ю. Ягупова,
Л. О. Антоненко, Т. Р. Феткуллин
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Россия,
ProtalinskyOM@mpei.ru, AndriushinAV@mpei.ru, YagupovaYY@mpei.ru,
AntonenkoLO@mpei.ru, FetkullinTR@mpei.ru

Аннотация. *В условиях интенсификации эксплуатации теплоэнергетических агрегатов на современных теплоэлектростанциях актуализируется необходимость разработки интеллектуальных подходов к оценке и прогнозированию технического состояния оборудования. В данной статье представлена концепция нейросетевой диагностики, основанной на параметрическом анализе эксплуатационных данных, обеспечивающем выявление скрытых и слабо выраженных дефектов в элементах энергетических установок до момента их критического развития. Предложенная методология основывается на применении искусственных нейронных сетей, структурно адаптированных для обработки многомерных временных рядов, описывающих динамику технических параметров различных узлов энерготехнического комплекса. Особое внимание в исследовании уделяется применению указанного подхода к диагностике состояния паровых турбин, как наиболее уязвимых и ответственных компонентов теплоэнергетической системы. В качестве прикладного примера рассмотрена турбина типа Т, для которой построена функциональная модель, реализующая нейросетевую обработку данных, полученных в процессе реальной эксплуатации. Обучение модели осуществляется на основе обобщённых индексов технического состояния, рассчитываемых для ключевых узлов агрегата с учётом весовых коэффициентов и нормативных требований. Представленные результаты демонстрируют способность предложенного подхода не только к выявлению ранних признаков деградации оборудования, но и к построению надёжных прогностических оценок технического ресурса, что создаёт предпосылки для внедрения адаптивных систем технического обслуживания на базе принципов предиктивной диагностики.*

I. Введение

В современных условиях экспоненциального роста нагрузки на теплоэнергетические комплексы особое значение приобретает эффективное раннее обнаружение неявных дефектов в элементах паровых турбин, поскольку прогностическая диагностика способна существенно снизить риск аварийных простоев и оптимизировать затраты на техническое обслуживание [1]. В настоящей работе предложена инновационная методика нейросетевой диагностики, основанная на преобразовании структуры энергетического оборудования в графовую модель, в которой вершины соответствуют функциональным узлам (арматура, корпус цилиндра, подшипники, ротор, система парораспределения и трубопроводы), а рёбра отражают эксплуатационные взаимосвязи между ними. Ключевым показателем с учётом весовых коэффициентов служит интегральный индекс технического состояния (ИТС), рассчитываемый по нормативной методике для каждого узла и агрегата в целом [2]. Данная методология сочетает мощь графовых свёрточных сетей (GCN) для пространственной агрегации признаков и рекуррентных автоэнкодеров для выявления аномалий, что позволяет не только регистрировать начальные стадии коррозионных, усталостных и кавитационно-абразивных процессов, но и прогнозировать динамику изменения ИТС на горизонте эксплуатационного планирования.

II. Моделирование системы диагностирования

Методика начинается с формализации структуры турбины Т-110/120-130 в виде взвешенного графа, где каждая вершина соответствует функциональному узлу (арматуре, корпусу цилиндра, подшипникам, ротору, системе парораспределения, трубопроводам), а каждое ребро отражает технологическую или механическую связь между ними. На вход нейросети каждой вершине передаётся вектор признаков:

$$x_i = [ITS_i, p_i, T_i, m_i, w_i, \alpha_i]^T \quad (1)$$

Где ITS- интегральный индекс технического состояния узла, рассчитанный по нормативным весовым коэффициентам, а остальные компоненты представляют собой ключевые эксплуатационные параметры. Далее используется графовая свёрточная нейронная сеть (GCN) [3], в которой на каждом слое агрегация признаков происходит по правилу.

$$h_i^{(l+1)} = \sigma * (\sum_{j \epsilon N(i)} \frac{1}{\sqrt{d_i * d_j}} * W^{(l)} * h_j^{(l)}) \quad (2)$$

Где N(i)- соседи вершины, di и dj- означают степени соответствующих вершин графа, (число её непосредственных соседей), $h_j^{(l)}$- векторное представление (эмбеддинг) узла после l-го слоя, W- обучаемая матрица весов, σ- нелинейность (ReLU, tanh или другая функция), вводящая способность модели аппроксимировать сложные зависимости. На следующем этапе для сигнализации аномалий используется автоэнкодер или регрессионный блок, обученный восстанавливать или предсказывать следующие значения ИТС. Финальный компонент методики — прогностический анализ: на основе динамики эмбеддингов графовой сети и статистики ошибок автоэнкодера строится предсказание изменения ИТС на горизонт до нескольких месяцев вперёд. Это позволяет выстраивать графики трендов технического состояния каждого узла и всего агрегата, выделять моменты приближения к критическому порогу и формировать заблаговременные рекомендации по техническому обслуживанию. Модель системы изображена рис.1.

Рис.1. Модель системы

III. Заключение

Предложенный подход объединяет параметрический расчёт ИТС, графовую агрегацию признаков и машинное обучение, что обеспечивает комплексную диагностику скрытых дефектов и высокоточную прогностику отказов — ключевые этапы для повышения надёжности и экономической эффективности эксплуатации турбин Т-110/120-130. Разработанная методика нейросетевой диагностики технического состояния турбинного оборудования на основе графовых нейронных сетей (GCN), интегральных индексов технического состояния (ИТС) и автоэнкодерной обработки эмбеддингов позволяет реализовать комплексный подход к мониторингу и прогнозированию скрытых дефектов в наиболее нагруженных и уязвимых узлах теплоэнергетических установок.

Литература

[1] Эксплуатационная диагностика теплового состояния и экономичности паровых турбин ТЭС и АЭС / *В. В. Божко, А. Н. Коваленко, В. М. Ляпунов, Л. А. Хоменок* // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 5. – С. 45-50. – DOI 10.1134/S0040363616030036. – EDN VRYZIT.

[2] Министерство энергетики Российской Федерации. Об утверждении Методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей: приказ от 26 июля 2017 г. № 676 // Собрание законодательства РФ. — 2017. — № 34. — Ст. 5266.

[3] *Hwan Kim, Byung-Suk Lee, Won-Yong Shin, Sungsu Lim*. "Graph Anomaly Detection with Graph Neural Networks: Current Status and Challenges" // *arXiv preprint*. — 2022.

Секция 2

Технические средства инфокоммуникационных технологий и систем связи

Hardware and software for information and communication systems

Методы исследования устойчивости систем жизнеобеспечения к природным воздействиям

Г. Г. Гребенюк, Л. А. Середа
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
gggrebenuk@gmail.com, Lsereda123@gmail.com

***Аннотация**. Выполнен анализ комплекса моделей и методов исследования функционирования инженерных систем жизнеобеспечения в условиях деструктивных событий, включающего модели угроз, в зоне действия которых находятся эти системы, уязвимостей, существующих в них, оценок вероятности повреждения, риска, восстановления и устойчивости. Отмечается сложность и неоднородность процессов поведения систем жизнеобеспечения, подлежащих моделированию, разнообразие условий их выполнения. В связи с этим большинство исследований посвящено анализу отдельных стадий функционирования, а не всему комплексу процессов, начиная от разрушения и заканчивая оценкой устойчивости. Для комплексного анализа поведения систем жизнеобеспечения в условиях деструктивных событий предлагается связать стадии исследования угроз, уязвимостей, разрушения и восстановления с соответствующими им дискретными событиями, их продолжительностью и моделями описания поведения системы на указанных стадиях. Обосновывается применение имитационного моделирования в качестве инструмента для комплексного анализа дискретных событий, явным образом формирующих процесс восстановления.*

I. Введение

Инженерная инфраструктура жизнеобеспечения включает информационно-коммуникационные, электрические, водные, газовые, транспортные, и другие сетевые системы. Она выполняет жизненно важную роль в государстве, обеспечивая современные города и поселения необходимыми услугами для проживания и трудовой деятельности населения. По этой причине сетевые системы проектируются так, чтобы работать надежно, безопасно и быть устойчивыми к деструктивным событиям [1] и являются дорогостоящими системами длительного действия.

Несмотря на сказанное выше, инфраструктуры остаются подверженными многим деструктивным событиям. Ураганы, землетрясения, наводнения, ледяные дожди, лесные пожары часто вызывают негативное воздействие на систему жизнеобеспечения страны и функционирование ее народного хозяйства. В результате таких событий и вследствие вызванных ими отказов компонентов снижается функциональность инфраструктуры, сокращается выпуск продукции промышленными предприятиями, что приводит к снижению уровня жизни населения. Аналогичные последствия вызывают диверсии и кибератаки.

II. Модели угроз. Физические и кибернетические уязвимости

Деструктивные события природного или техногенного характера могут превышать допустимые границы, определяющие нормальное функционирование системы. Также они в силу пространственного расположения инженерных сетей могут оказывать негативное воздействие не локально, а в некоторой зоне «поражения», в определенной географической области. Вследствие этого могут наблюдаться множественные отказы элементов системы и более тяжелые последствия, чем при одиночных отказах, вплоть до полной потери работоспособности системы или ее разрушения.

В литературе приводятся базы данных [2], которые включает различные типы катастроф, такие как наводнения/штормовые приливы/цунами, ураганы/циклоны, землетрясения, лесные пожары, преступные действия/терроризм.

Угрозы могут действовать на характерные для них уязвимости. Уязвимости могут присутствовать в топологии системы из-за низкого уровня резервирования ответственных узлов, в

географическом расположения ее элементов, подверженным ураганам и наводнениям, ошибках, допущенных при проектировании или вводе в эксплуатацию и техническом сопровождении, например, в неправильной логике работы системы управления, нарушении сроков технического обслуживания и др.

Уязвимости можно разделить на физические и кибернетические. Физические воздействия осуществляются на такие инженерные объекты и их компоненты, как насосные или компрессорные станции, электрические подстанции, трубопроводы, плотины и т.д. Возникновение кибер-уязвимостей обусловлено повышением уровня автоматизации и внедрением искусственного интеллекта в управление инженерными системами. При этом повышается и уровень сложности ее компонентов и используемых информационных технологий, что приводит к увеличению количества потенциальных точек доступа к вторжению.

Как правило, кибернетические и физические воздействия приводят к одинаковым последствиям, в число которых входят отключения от ресурсов важных потребителей, возникновение каскадных процессов, массовое отключение электроэнергии у населения и т.д.

При анализе уязвимости основное внимание уделяется изучению последствий сбоев для выявления слабых сторон системы. Для этого широко используется топологический анализ графа системы и различные сценарии его «повреждений».

Основными сценариями поиска сетевых уязвимостей в топологическом анализе являются: случайный выбор объекта воздействий; выбор по степени узла; выбор по промежуточности узла; потеря связности источников (генераторов) и нагрузки; трафик узла и т.д.

Общепринятой практикой определения физической уязвимости инфраструктуры является оценка кривой хрупкости [3]. Этот метод используется при оценке риска, а также может быть использован в оценке устойчивости.

Совокупную оценку последствий с учетом вероятности реализации угрозы принято называть риском [4]. Управления рисками недостаточно для повышения устойчивости, поскольку этот подход не охватывает свойства и характеристики системы, выходящие за пределы надежности [5,6]. Устойчивость можно рассматривать как качество, снижающее уязвимость элемента, поглощающее последствия деструктивных событий, повышающее способность элемента реагировать и восстанавливаться, а также облегчающее его адаптацию к событиям, подобным тем, которые происходили в прошлом.

II. Модели восстановления

При моделировании восстановления особое значение приобретает учет имеющихся ресурсов (ремонтного персонала, специальной техники и т.д.), которые индивидуальны для каждой решаемой в этой области задачи. Относительно ресурсов и методов решения можно выделить три направления исследований [7]:

- использование статистических данных по ранее восстановленным объектам и территориям и их “подгонка” к условиям рассматриваемой задачи;
- применение детерминированных правил и набора уравнений, упрощенно учитывающих указанные ресурсы. Например, количество ремонтного персонала принимается как доля от численности проживающего населения и т.д.;
- сетевые методы.

III. Устойчивость и имитационное моделирование

Способность системы противостоять сбоям, реагировать на них и восстанавливаться после них можно описать кривой устойчивости. Эта кривая иллюстрирует изменения с течением времени выбранного показателя эффективности в рамках конкретного сценария [8].

Устойчивость понимается как процесс, включающий стадии предотвращении, поглощении, восстановлении и адаптации системы [5].

В настоящее время не существует согласованных показателей устойчивости инженерной инфраструктуры, которые позволяли бы проводить сравнения различных систем между собой. Текущие исследования устойчивости, как правило, сосредоточены на конкретных системах и конкретных неблагоприятных событиях. Поэтому процесс принятия решений является ситуативным и привязанным к историческим примерам.

Тем не менее за последние годы разработано несколько показателей для оценки устойчивости [9-12] с учетом таких аспектов как надежность, восстанавливаемость, адаптивность и др. Широко используется интегральная метрика [11], согласно которой показатель устойчивости Ф оценивается как

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_4} P_c\,(t)dt \Big/ \int_{t_0}^{t_4} P_n\,(t)dt\,, \qquad (1)$$

где $P_c(t)$ – реальная (текущая) производительность сети на контрольном интервале выполнения оценки $[t_0, t_4]$, $P_n(t)$ – производительность при нормальном функционировании сети.

Для поддержки принятия решений в области поиска уязвимостей при действии тех или иных угроз, анализа процессов нарушения функционирования систем и последующего восстановления удобно использовать сценарный подход и имитационное моделирование. В частности, в связи с естественным разделением на стадии описанных выше процессов предлагается использовать дискретно-событийное моделирование (DES). Проектирование конкретного DES для решения описанных выше задач состоит из задания сущностей, событий и ресурсов и их отношений, определяющих сценарии управления восстановлением.

Примерами сущностей для систем жизнеобеспечения могут быть подстанции, мосты, участки трубопроводов и т.д. События связаны с изменением состояния таких сущностей или ресурсов. К ним могут относиться возникновение разрушительных воздействий, характеризующихся определенной продолжительностью, формирование инспекции для оценки ущерба, расчет приоритетов ремонта и т.д. Ресурсы представляют собой активы для восстановления, такие как ремонтный персонал, техника, финансы и др., как правило, ограниченные по величине. Последовательность дискретных событий раскрывается при моделировании поведения сущностей и ресурсов в сценариях с изменяющимися угрозами, уязвимостями, длительностями событий и т.д.

DES по отношению к производственной инфраструктуре или инфраструктуре жизнеобеспечения понимается как метод моделирования ее функции производительности. Точки на оси времени описанного выше процесса представляют собой серию «событий», входящих в имитационную модель.

IV. Заключение

В настоящее время в исследовательских центрах Америки, Европы и Азии активно развиваются научные подходы к анализу неблагоприятных воздействий на инженерные системы жизнеобеспечения населения электроэнергией, водой, транспортом, информацией, связью и др. Эти подходы в значительной степени влияют на инженерную устойчивость и касаются различных аспектов функционирования систем жизнеобеспечения в условиях угроз, в зоне действия которых они находятся, и уязвимостей, существующих в этих системах. Анализ показал, что из-за сложности и неоднородности процессов функционирования инженерных систем при деструктивных событиях, разнообразия условий применения моделей и методов указанные исследования, как правило, ограничиваются разработкой отдельных моделей угроз, поиска уязвимостей, оценок вероятности повреждений систем, риска, восстановления и устойчивости и стадий функционирования и не рассматривают процессы в комплексе, начиная от разрушения и заканчивая оценкой устойчивости.

Для комплексного анализа поведения системы жизнеобеспечения условиях разрушительных воздействий предлагается связать стадии исследования угроз, уязвимостей, разрушения и восстановления с соответствующими дискретными событиями, их продолжительностью и моделями

описания поведения системы в пределах указанных стадий. Инструментом для такого комплексного анализа может служить имитационное дискретно-событийное моделирование.

Литература

[1] *R. Reid* “How to make infrastructure more resilient against climate change”, *American society of civil engineers*, 2022. URL: https://www. asce. org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2022/01/how-to-make-infrastructure-more-resilient-against-climate-change.

[2] *R. Ryan, L. Wortley,* “Evaluations of post-disaster recovery: A review of practice material”, *Evidence Base No.* 6, 2016, pp.1-33.

[3] *S. Bjarnadottir, Y. Li, M.G. Stewart* “Hurricane risk assessment of power distribution poles considering impacts of a changing climate”, *J. Infrastruct. Syst. Vol.* 19(1), 2013, pp.12-24.

[4] *R. Arghandeh, A. Meier, L. Mehrmanesh, L. Mili* “On the definition of cyber-physical resilience in power systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev. Vol.* 58, 2016, pp.1060-1069.

[5] *D. Rehak, P. Senovsky, M. Hromada, T. Lovecek* “Complex Approach to Assessing Resilience of Critical Infrastructure Elements”, *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot. Vol.* 25, 2019, pp.125-138.

[6] *Г.Г. Гребенюк, Н.В. Лубков* “Надежностный подход к анализу устойчивости инженерной инфраструктуры”, *УБС. №* 99, 2022, с.157-181.

[7] *Z. Cagnan, R. Davidson* “Post-earthquake restoration modeling of electric power systems”, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004, pp. 1-12.

[8] *C. Poulin, M. B. Kane* “Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics”, *Reliab. Eng. Syst. Saf. Vol.* 216, 2021, pp. 107926.

[9] *M. Barthelemy* “Spatial Networks”, *Phys. Rep. Vol.* 499, 2011, pp.1-100.

[10] *M. Panteli, P. Mancarella, D.N. Trakas, E. Kyriakides* “Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems”, *IEEE Trans. Power Syst. Vol*. 32(6), 2017, pp. 4732-4742.

[11] *M. Ouyang, L. Duenas-Osorio, X. Min* “A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems”, *Struct. Saf. Vol.* 36, 2012, pp.23-31.

[12] *F. Hu., C. H. Yeung, S. Yang, W. Wang, A. Zeng* “Recovery of infrastructure networks after localised attacks”, *Sci. Rep. Vol.* 6(1), 2016, pp. 24522.

Development of an omnichannel contact center model with chatbot service time

M. S. Stepanov, V. G. Popov
Moscow Technical University of Telecommunication and Informatics, Moscow, Russia,
m.s.stepanov@mtuci.ru, valentin1732@mail.ru

Abstract*. The article describes the development of a comprehensive customer service model that combines automated and human resources. The study includes an analysis of current trends in customer service, the development of a functional model of the contact center and its use to build a mathematical model. Among the features taken into account are two-stage customer requests service (chatbots and agents), chatbot service time, the ability to wait for the start of service at the agent stage. The further direction of the study is determined, consisting in estimating the characteristics of the developed model.*

I. Introduction

High quality customer service is a key factor for success in any area of modern business. Contact centers remain one of the main tools for organizing interaction between a company and its clients. Their omnichannel nature allows to call the company, write an email, leave a question on the website or use a messenger. Various automated systems are widely used, such as a AI-based chatbot (modern solution) or interactive voice response system IVR (classic solution). At the same time, the quality of the request service should not depend on the selected interaction channel. Also, an important feature of modern contact centers is the presence of several stages of service. For example, at first the client communicates with a chatbot, then, if necessary, with an agent. The degree of this process seamlessness directly impacts the customer experience.

Agents' salaries continue to be the main expense item for contact center administration. Therefore, planning of their numbers is a pressing issue. Traditionally, software tools based on classical models of teletraffic theory are used to solve this problem [1,2]. However, in this case, the assessment of the number of agents often gives an overestimated result. This is due to the fact that these models do not take into account many important features of modern contact centers. These include the possibility of repeated calls, several stages of service, the presence of several groups of agents, etc. The effect of having these features separately in contact center models was studied in [3-5].

In recent years, one of the major trends in customer service has been the implementation of AI-based solutions. First of all, this is the use of various voice assistants to automate customer service. A chatbot can be called a logical development of the IVR system, as it allows processing a large number of similar client requests, freeing up agents for more complex questions. Of course, this must be taken into account when planning the number of personnel. Research into developing contact center models using chatbots is in its early stages. This underlines the relevance of this topic.

II. Functional model

In [5], the construction of a contact center model for a university admission office is considered. It takes into account the implementation of a chatbot as one of the stages of servicing incoming client requests. Incoming requests are categorized according to their complexity. However, this model does not include a parameter for the time it takes for the chatbot to service a request. We propose to improve the model by adding this feature. This way we can take into account the impact of how well the automatic system is configured. It is known from practice that a chatbot may not immediately understand the meaning of a client's request or may not understand it at all. This leads to the need to ask again and incorrect answers, which brings the whole process back to the beginning. At the same time, service times increase and customer experience deteriorates.

To build a mathematical model of a contact center that takes into account the service time of a chatbot, first it is necessary to consider the functional model of this communication system. It is shown in Fig.1.

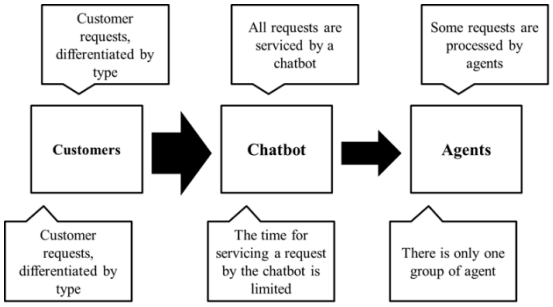


Fig.1. The functional model

The model includes two stages of customer service. Requests of different types are received by the contact center and go to the chatbot. There they are served for a certain period of time. Then, some requests are routed to the agents combined into one group. At this stage, the possibility of waiting is taken into account and there is a queue with a finite number of places. Therefore, the impatience of customers can be taken into account.

After analyzing the functional model, we can build a mathematical model of the considered system. Its diagram is shown in Fig.2.

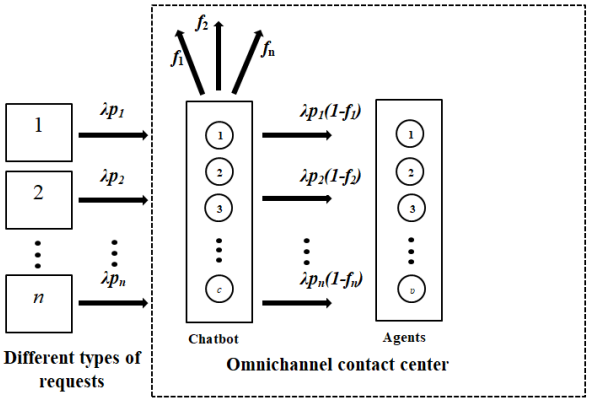


Fig.2. The mathematical model

The Poisson flow of requests enters the contact center with intensity λ. There are n categories of requests in the model – from basic type to more complex ones. Belonging to a certain category is determined through the corresponding probability p_k, $k = 1,2,..n$. In addition, the model has another set of probabilities f_k, $k = 1,2,..n$. It determines the proportion of requests from each category that will not need service from the agent. For the category with the most routine requests, the probabilities p_k and f_k will be the largest, since there are a majority of such requests, according to various statistics [5]. For request categories that are more likely to require extended agent assistance, the values of these parameters will decrease. It's obvious that $\sum_{k=1}^{n} p_k = 1$ and $\sum_{k=1}^{n} f_k = 1$.

As was mentioned above, the considered model takes into account two stages of request servicing. First stage is a chatbot, It can be described as a classic Erland B queuing system. The chatbot service time has an exponential distribution with the parameter μ_1. Let us denote the number of resource units at this stage by c is taken to be deliberately large in order to emphasize that the virtual resource is much larger than the physical one. But, at the same time, it is not infinite. Part of the requests that do not receive the necessary service via the chatbot is routed to the next stage.

The agents service process is a queuing system with waiting and a finite queue. Let us denote the number of agents by v and the number of waiting places by w. The agent service time has an exponential distribution with the parameter μ_2.

III. Further steps

The next step of the study is to derive expressions for assessing the characteristics of the quality of requests service through the values of the input parameters and stationary probabilities of the developed contact center model. These include the proportion of requests lost at different stages, the average number of busy agents, etc. With their help, it will be possible to analyze the effect of various procedures aimed at increasing the efficiency of requests servicing in the contact center.

To evaluate the indicated characteristics, it will be necessary to construct a system of equilibrium equations and solve it using any classical way, for example, Gauss-Seidel iteration method.

IV. Conclusion

Thus, in the article the main trends in customer service related to automation are analyzed. The need of taking these features into account when estimating the number of contact center agents is noted. A functional model of an omnichannel help desk including two stages of servicing of client request (chatbot and agents) is proposed. Based on these assumptions, a mathematical model of the contact center is constructed and its functioning is described. Further steps of the research, related to the assessment of the characteristics of the constructed model and the formulation of recommendations for its use, are presented.

References

[1] S. N. Stepanov. Teletraffic Theory: Concepts, Models, Applications. Moscow «Goryachaya linia-Telecom», 2015, 868p.

[2] *N. Gans, G. Koole, A.Mandelbaum*. "A telephone call centers: Tutorial, review, and research prospects", *Manufacturing and Service Operation Management*. no.5, 2003, pp.79-141.

[3] *R. Shrinivasan, J. Talim , J. Wang*. "Performance analysis of a call center with interactive voice response units", *Sociedad de Estadistica e Investigacion Operativa Top*, v.12., no.1, 2004, pp. 91-110.

[4] *V. Popov, M. Stepanov*, "An overview of models for contact center resource planning", T-Comm, vol.18, no.10, 2024, pp.55-63.

[5] *M. Stepanov, V. Popov V., N. Fedorova, F. Kroshin, A. Muzata*. "The Automation of Client Servicing in University and College Admission Office" *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, vol.,6, no.1, 2023, pp. 454-460.

Метод выполнения арифметических операций над числами в конечных полях характеристики 2 и его применение в криптографии

М. А. Баранчик, Е. Г. Крупенич, С. А. Мигалевич
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Беларусь,
runolero@gmail.com

Аннотация. *В настоящей работе исследуются методы выполнения арифметических операций в конечных полях характеристики 2 и их применение в криптографии. Рассмотрены базовые операции – сложение и умножение, – а также их оптимизация для эффективной реализации. Показано, что сложение элементов поля $GF(2^5)$ эквивалентно операции XOR над двоичными строками, а умножение требует модульной редукции по неприводимому многочлену. Предложен итеративный алгоритм умножения, основанный на сдвигах и условных сложениях. Особое внимание уделено практическому применению конечных полей в криптографии, включая симметричные шифры (AES, Кузнечик), коды коррекции ошибок (Рида–Соломона, Гоппы), а также асимметричные и постквантовые системы (Мак-Элиса, эллиптические кривые). Установлено, что конечные поля обеспечивают высокую стойкость криптографических алгоритмов к современным угрозам, включая квантовые атаки. Результаты работы подчеркивают важность дальнейших исследований для повышения безопасности информационных систем.*

I. Введение

Конечным полем называется конечное множество, на котором определены произвольные операции, называемые сложением, умножением, вычитанием и делением (кроме деления на 0) в соответствии с аксиомами поля [1].

Конечные поля, или поля Галуа, играют важную роль в теории чисел, алгебраических структурах и их приложениях в информатике. Поля характеристики 2 представляют особый интерес, потому что их можно легко представить в виде двоичных строк. Арифметические операции в конечных полях характеристики 2, включая сложение, умножение и вычисление обратных элементов, лежат в основе многих криптографических алгоритмов. Примеры таких алгоритмов включают схемы симметричного и асимметричного шифрования, алгоритмы генерации цифровых подписей и криптографические протоколы на основе эллиптических кривых. Оптимизация выполнения этих операций является важной задачей для повышения производительности и безопасности криптографических систем.

Рассматриваются методы выполнения арифметических операций над элементами конечных полей характеристики 2, а также их применение в криптографии.

II. Сложение в конечном поле характеристики 2

В качестве примера рассмотрим конечное поле $GF(2^5)$. Будем считать, что неприводимый над $GF(2)$ многочлен $p(x)$ степени 5 мы уже построили. Пусть $p(x) = x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$. Каждый элемент поля имеет вид $a_4\alpha^4 + a_3\alpha^3 + a_2\alpha^2 + a_1\alpha + a_0$, где $\alpha \in GF(2^5)$ – корень многочлена $p(x)$, все $\alpha_i \in GF(2)$. Поэтому каждый такой элемент можно закодировать двоичной строкой $a_4a_3a_2a_1a_0$ для удобства хранения в ПК. В таком случае операция сложения многочленов будет представлять собой операцию XOR над соответствующими строками.

III. Умножение в конечном поле характеристики 2

Пусть $a = a_4\alpha^4 + a_3\alpha^3 + a_2\alpha^2 + +a_1\alpha + a_0$ и $b = b_4\alpha^4 + b_3\alpha^3 + b_2\alpha^2 + b_1\alpha + b_0$ – элементы поля $GF(2^5)$. Умножим первый элемент поля на второй:

$$a \cdot b = \left((a_4\alpha^4 + a_3\alpha^3 + a_2\alpha^2 + a_1\alpha + a_0) \cdot (b_4\alpha^4 + b_3\alpha^3 + b_2\alpha^2 + b_1\alpha + b_0)\right) \ mod \ \ p(\alpha) \quad (1)$$

После раскрытия скобок и перехода к двоичным строкам получим:

$$a \cdot b = (a \cdot b_4 0000 + a \cdot b_3 000 + a \cdot b_2 00 + a \cdot b_1 0 + a \cdot b_0) \ \ mod \quad 10111 \quad (2)$$

Учитывая то, что переменная b может принимать только значения 0 или 1, последнее можно переписать в следующем виде:

$$a \cdot b = ((10000 \cdot a) \ \ mod \quad 101111) \cdot b_4 + ((1000 \cdot a) \ \ mod \quad 101111) \cdot b_3 +$$

$$+\left((100 \cdot a) \ \ mod \quad 101111\right) \cdot b_2 + \left((10 \cdot a) \ \ mod \quad 101111\right) \cdot b_1 + a \cdot b_0 \quad (3)$$

Теперь рассмотрим произвольный элемент поля $c \in GF(2^5)$, представленный двоичной строкой. Тогда $(c \cdot 10) \ \ mod \quad 101111 = c$, если $c \cdot 10 < \ 100000$, и $(c \cdot 10) \ \ mod \quad 101111 = c + 101111$, если $c \cdot 10 \geq 100000$. Тогда $(c \cdot 100) \ \ mod \ \ 101111$ можно представить следующим образом:

$$(c \cdot 100) \ \ mod \quad 101111 = \left(\left((c \cdot 10) \ \ mod \quad 101111\right) \cdot 10\right) \ \ mod \quad 101111 \quad (4)$$

Аналогичным образом раскладываются $c \cdot 1000$, $c \cdot 10000$ и т. д.

Теперь можно построить итеративный алгоритм, на каждой итерации которого текущее значение элемента a умножается на 10 (сдвиг влево) по модулю порождающего многочлена поля, полученный результат присваивается переменной a. После этого полученное значение умножается на разряд b, соответствующий текущей итерации и добавляется к переменной r, хранящей текущий результат.

Схема описанного алгоритма представлена на рисунке 1.

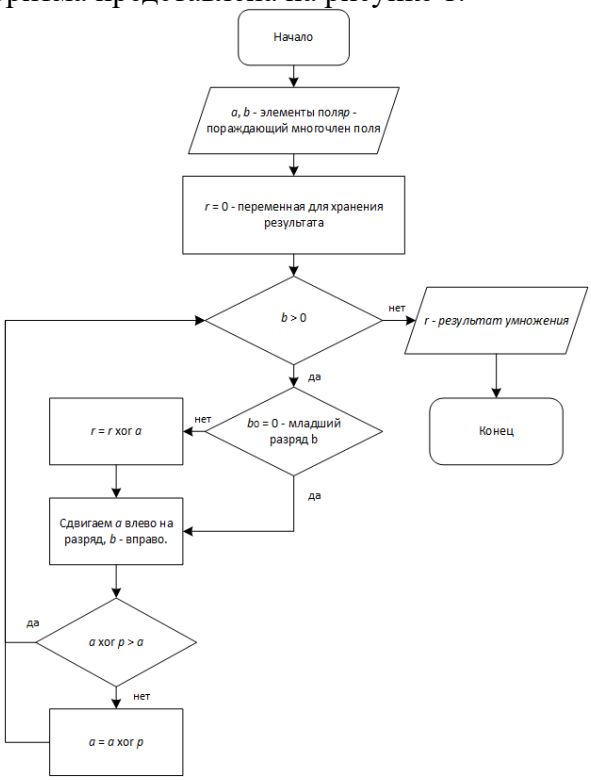


Рис. 1. Алгоритм умножения элементов конечного поля

IV. Применение

Конечные поля применяются в симметричных шифрах, таких как AES и Кузнечик, конечные поля (например, $GF(2^8)$) служат основой для построения нелинейных подстановок, которые обеспечивают высокую стойкость алгоритмов к различным атакам. Эти шифры получили признание на международном уровне и используются в стандартах, таких как ISO/IEC 18033-3:2010 для AES и ГОСТ Р 34.12-2015 для Кузнечика.

Код Рида–Соломона, построенный на основе арифметики конечных полей, нашел применение в оптических дисках, системах хранения данных, спутниковой связи и QR-кодах. Коды Гоппы, также основанные на конечных полях, используются для создания исправляющих кодов, способных обнаруживать и корректировать ошибки в каналах связи [2]. Их применение не ограничивается только коррекцией ошибок, они также интегрируются в криптографические протоколы, где необходима дополнительная защита и устойчивость системы

Конечные поля играют также ключевую роль в построении асимметричных и постквантовых криптосистем. Примером является криптосистема Мак-Элиса [3], в основе которой лежит задача декодирования случайных линейных кодов, построенных с использованием конечных полей. Такие подходы позволяют создавать алгоритмы, устойчивые к атакам с использованием квантовых компьютеров, а также способствуют развитию новых направлений в постквантовой криптографии. Помимо этого, многие криптографические конструкции, в том числе алгоритмы на эллиптических кривых, используют конечные поля для задания математической структуры, необходимой для обеспечения безопасности и эффективности криптографических операций.

Кроме того, конечные поля находят применение в построении имитостойких схем и кодов аутентификации [4]. Здесь они обеспечивают математическую строгость, позволяя создавать оптимальные конструкции, способные обнаружить даже минимальные изменения в передаваемых данных. Это особенно важно для защиты информации от подмены или подделки. Также конечные поля используются в генераторах псевдослучайных чисел, что имеет значение для криптографических протоколов, где необходимы последовательности с хорошими статистическими свойствами. Теоретические исследования, опирающиеся на арифметику конечных полей, позволяют анализировать стойкость алгоритмов, строить доказательства их безопасности и выявлять потенциальные уязвимости.

V. Заключение

В данной работе рассмотрены методы выполнения базовых арифметических операций – сложения и умножения – в конечных полях характеристики 2, а также проанализированы области их применения. Конечные поля обеспечивают надежность симметричных шифров, каких как AES и Кузнечик с помощью нелинейных подстановок, эффективную коррекцию ошибок в системах хранения и передачи данных через коды Рида-Соломона и Гоппы, а также являются основой для асимметричных постквантовых криптосистем, таких как система Мак-Элиса и алгоритмы на эллиптических кривых. Дальнейшие исследования в данной области важны для повышения устойчивости информационных систем к современных угрозам.

Литература

[1] *Журавлёв Ю.И.*, *Флеров Ю.Ф., Вялый М.Н.* (2007) Дискретный анализ. Основы высшей алгебры. *Москва, Издательство «МЗ Пресс»*.

[2] *Рацеев С.М.* (2022) Элементы высшей алгебры и теории кодирования: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург, *Издательство «Лань»*.

[3] *Dinh H., Moore C., Russell A.* (2011) McEliece and Niederreiter Cryptosystems That Resist Quantum Fourier Sampling Attacks. *Advances in Cryptology – CRYPTO 2011*. (31), 761–779.

[4] *Рацеев С.М.* (2022) Математические методы защиты информации: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург, *Издательство «Лань»*.

Индексные нейронные сети

А. М. Михайлов, М. Ф. Каравай
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
alxmikh@gmail.com, mkaravay@yandex.ru

***Аннотация**. Нобелевская премия по физике 2024 года была присуждена Хопфилду и Хинтону за основополагающие открытия, которые позволили обучать искусственные нейронные сети, используя физические аналогии. Однако мы считаем, что именно биологические, а не физические аналогии помогают устранить вычислительные проблемы, связанные с машинным обучением, когда требуется вычислять огромное количество коэффициентов. Использование биологических аналогий позволяет достигать практически мгновенного машинного обучения. В этой статье представлены математические модели искусственных нейронных сетей на основе биологических аналогий. Такие сети называются индексными нейронными сетями, поскольку они моделирует колонковую архитектуру кортексных нейронов, - архитектуру, которая указывает на индексную природу коры головного мозга. В статье рассмотрено математическое описание индексных нейронных сетей (индекстронов) и его использование в некоторых прикладных задачах.*

I. Введение

При использовании систем машинного обучения в быстро меняющейся и иногда враждебной среде часто выбираются комбинации методов глубокого обучения и других более классических методов [1]. Но методы глубокого обучения связаны с необходимостью вычисления огромного количества коэффициентов. Мы считаем, что этот недостаток проистекает из того факта, что обычно машинное обучение использует инструменты, заимствованные из физики [2], а не из биологии. Например, машина Больцмана использует инструменты из статистической физики, тогда как сеть Хопфилда использует физический аппарат, моделирующий характеристики материалов с учетом их атомных спинов. Однако биологические аналогии могут открыть дорогу к построению более адекватных моделей в области машинного обучения. Например, обучение всегда является проблемой для искусственных нейронных сетей, поскольку для настройки их синаптических весов требуется много вычислительных циклов. Напротив, мгновенное обучение становится возможным на основе биологических аналогий, приводящих к индексным нейронным сетям, которые вообще не используют арифметические операции, поскольку у них нет настраиваемых коэффициентов. Вместо обучения путем вычислений, индексная нейронная сеть (индекстрон) обучается путем записи образов в их обратной форме. И, помимо экономии энергии, точность машинного обучения на основе индексных сетей может соперничать с точностью методов глубокого обучения. В статье обсуждаются элементы математического аппарата индексных нейронных сетей, - сетей, моделирующих функцию кортикальной колонки коры головного мозга. На самом деле, колонковая организация нейронов коры мозга была открыта более полувека назад. Однако функция колонки долгое время оставалась неизвестной. Общее мнение состояло в том, что колонка является основным вычислительным модулем коры мозга. Но, как указано в [3], колонка не является вычислительным устройством. В действительности, каждая кортикальная колонка – это разветвитель, одновременно рассылающий ее входной сигнал по многим направлениям. При этом наиболее активное направление (посещаемый узел) определяет класс входного образа, физически являющегося комбинацией входных сигналов колонок. Совокупность активированных узлов определяет активность классов. Фактически, любая сеть может быть описана индексами узлов, - узлов, организованных в колонки, адресами которых служат значения признаков входного образа. Рис. 1 представляет собой упрощенный пример такого представления. Он показывает, что способность распознавать или различать образы определяется существующими связями. В примере на рис. 1, все связи двенадцати узлов сети были выбраны случайным образом. При поступлении образа $\{b, g\}$, содержащего два

признака, связи, изображенные жирными линиями, становятся активными. В результате узлы (пункты назначения) {1,2,5,3,4,6} тоже становятся активными. Но наиболее активным является 3-й узел, где гистограмма активности узлов достигает своего максимума. Гистограмма (верхний правый угол рисунка 1) может быть получена из колонковой структуры сети (нижний правый угол рисунка 1), где индексы входных узлов изменяются от *a* до *i*, а индексы узлов назначения - от 1 до 12.

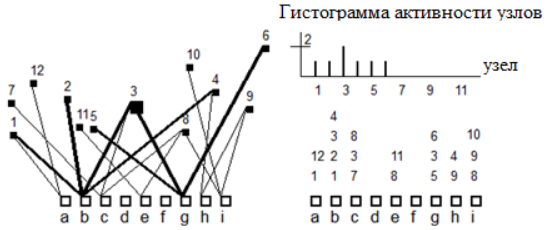


Рис. 1. Сеть и ее колонковое представление

Существует разница между представлением образов множествами признаков и векторами признаков. В первом случае обратное представление состоит из одного набора колонок, (рис. 2), а в векторном случае обратное представление состоит из частей, число которых равно числу измерений векторного пространства (рис. 3). В обоих случаях горизонтальные оси представляют значения признаков, тогда как числа над осями – это индексы образов. Поскольку обратное представление векторов включает несколько осей, возникающее более разреженное распределение имен образов приводит к более надежной процедуре распознавание векторов по сравнению с распознаванием множеств. Но так как размер доклада ограничен, случай множеств будет рассмотрен в будущих публикациях. Тем не менее, на рис.2 приведен пример обратного представления образов, заданных множествами.

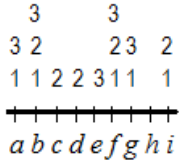


Рис. 2. Обратное представление множеств

На рис. 2 образы $\{a,b,f,g,i\}_1$, $\{b,c,d,f,i\}_2$, $\{a,b,e,f,g\}_3$, имеют следующее обратное представление:

$\{1,3\}_a, \{1,2,3\}_b, \{2\}_c, \{2\}_d, \{3\}_e, \{1,2,3\}_f, \{1,3\}_g, \{\}_h, \{1,2\}_i$. То есть признак *a* входит в образы 1 и 3,

признак *b* – в образы 1, 2, 3 и т.д. для остальных признаков. Данное преобразование заменяет элементы множеств на индексы этих множеств. Обратное представление множеств $\{ X_n,\ n=1,...,N \}$, определяется следующим образом [4]

$$\{n\}_x = \{n: x \in X_n\}_x, x \in \bigcup_{n=1,...,N} X_n$$

Здесь обратный образ $\{n\}_x$ - это множество индексов множеств, содержащих признак *x*.

Обратное представление векторов $\mathbf{x}_n = (x_{n,1},...,x_{n,1}),\ n=1,...,N$, заданных в F -мерном пространстве признаков, определяется как

$$\{n\}_{x,f} = \{n: x = x_{n,f}\}_{x,f},\ f = \overline{1,F}, \forall x \in \bigcup_{n,f} x_{n,f}$$

Каждое множество $\{n\}_{x,f}$ содержит индексы n тех векторов, у которых измерение f содержит компонент $x_{n,f}$, равный x.

В общем случае при обратном представлении произвольных объектов их элементы заменяются индексами объектов. На рис. 3 показано обратное представление трех 5-ти мерных векторов $\{a,b,f,g,i\}_1$, $\{b,c,d,f,i\}_2$, $\{a,b,e,f,g\}_3$, в котором индексы векторов расположены над пятью горизонтальными осями признаков

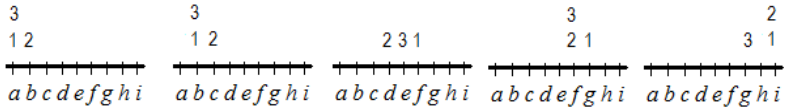


Рис. 3. Обратное представление трёх 5-ти мерных векторов

Обратные представления ведут свое начало от полностью инвертированных файлов, которые появились в информатике [5]. Например, полностью инвертированная книга содержит алфавитный перечень всех слов книги, в котором для каждого слова приведен список номеров страниц книги, содержащих данное слово. Однако, если вместо слов используются числовые значения признаков, то возникает проблема помехозащищенности. Эта проблема решается с помощью введения радиуса R окрестностей признаков. Ниже представлен более строгий математический формализм, элементы которого появились ранее, в частности, в [6].

II. Результаты

1) Введено понятие индексных искусственных нейронных сетей. Это понятие позволяет заменить машинное обучение, основанное на алгебраических операциях на машинное обучение, основанное на теоретико-множественных операциях и операциях обратной индексации.

2) Предложен математический аппарат, формализующий процесс практически мгновенного обучения индексных нейронных сетей путем инверсии образов без использования арифметических операций.

3) Индексное обучение характеризуется линейным ростом вычислительной сложности $O(N)$ при увеличении количества N обучающих образов.

III. Векторный случай

Ниже в данной работе все образы представлены векторами признаков, а все переменные – целыми числами. Пусть задан входной вектор $x = (x_f, f = 1,\dots,F)$ и набор из N образов, представленных N строками признаков

$$(x_{n,f})_{N\times F} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,F} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,F} \end{pmatrix}$$

Требуется найти строчку x_m, содержащую максимальное число признаков, совпадающих с признаками входного образа, то есть,

$$m: H_R(\mathbf{x},\mathbf{x}_m) = \overset{n=1}{\underset{N}{max}} H_R(\mathbf{x},\mathbf{x}_n) \qquad (1)$$

Здесь, R - это радиус обобщения признака (размер окрестности признака), а $H_R(\mathbf{x},\mathbf{x}_n)$ - это сходство векторов $\mathbf{x}$ and $\mathbf{x}_n$ по Хэммингу, определяемое числом сходных признаков. По определению, образы $\mathbf{x}_n = (x_{n,1},...,x_{n,F})$ и $\mathbf{x}_m = (x_{m,1},...,x_{m,F})$ имеют сходный признак в измерении f, если $|x_{n,f} - x_{m,f}| \le R$. Распределение сходных признаков между векторами $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}_n$ может быть найдено из следующего выражения

$$H_R(n|\mathbf{x}) = |\{f: n \in \bigcup_{|x-x_f|\le R} \{n\}_{x_f,f}|, f = 1,\dots,F, n = 1,\dots,N \quad (2)$$

Заметим, что похожее выражение было предложено в [4]. Однако выражение в [4] содержит ряд неточностей, устраненных в выражении (2). Множества $\{n\}_{x,f}$ находятся при обучении при условии, что признаки $\tilde{x}$ были нормализованы к целочисленным значениям следующим образом ([4])

$$x = M(\tilde{x} - \tilde{x}_{\min})/(\tilde{x}_{\max} - \tilde{x}_{\min}),$$

где M - это целое число, а скобки [ ] обозначают операцию целочисленного деления.

Общее число схожих признаков у векторов $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}_n$ равно $H_R(n|\mathbf{x})$ расстоянию Хэмминга между векторами, как оно определено выше. Это является следствием следующих свойств индексного преобразования, а именно, множество колонок в каждом измерении f

- содержит N разных индексов: $\sum_{x=0}^{X-1} |\{n\}_{x,f}| = N$,
- не содержит пересекающихся колонок: $\{n\}_{x,f} \bigcap \{n\}_{y,f} = \varnothing$.

Обратное представление векторов в выражении (1) находится с помощью следующего алгоритма ([3])

$m = 1,\dots,N,\ f = 1,\dots,F,\ \{n\}_{x_{m,f},f} = \{n\}_{x_{m,f},f} \bigcup m$

при начальных условиях: $\{n\}_{x_{m,f},f} = \varnothing,\ \forall\ m, f$

Алгоритм для нахождения распределения сходства $H_R(n|\mathbf{x}),\ n = 1,\dots,N$, записывается как

$\forall f,\ \forall\ |\rho| \le R,\ \forall n \in \{n\}_{x_f+\rho,f} : H_R(n|\mathbf{x}) = H_R(n|\mathbf{x}) + 1$

Здесь $\mathbf{x} = (x_1,\dots,x_f,\dots,x_F)$ - это входной вектор.

Радиус обобщения влияет следующим образом на результаты работы алгоритма распознавания образов. Если $R = 0$, то $H_R(n|\mathbf{x}) = F \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{x}_n$. Это приводит к отсутствию обобщения и помехозащищенности. Использование значений радиуса, близких к 100% диапазону признаков, приводит к чрезмерному обобщению и к невозможности различать образы, так как в этом случае распределение сходства (гистограмма $H_R(n|\mathbf{x}),\ n = 1,\dots,N$) становится постоянной функцией. Если образы разделены на обучающую и тестирующую части, то оптимальное значение R максимизирует точность распознавания $A(R)$ образов тестирующей части. Однако, при обучении с учителем, рекомендуется выбирать значение $R = 0$. При обучении без учителя число классов выбирается автоматически и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением радиуса R. Вычислительные эксперименты показали, что точность (*accuracy*) индексных нейронных сетей в терминах истинных (*true*) и ложных (*false*) ответов, то есть, $accuracy = true/(true + false)$ зависит от радиуса R. В экспериментах точность оценивалась путем обучения модели 1000 случайных образов и последующего распознавания тех же образов, но с признаками, искаженными случайным шумом. Было найдено, что при уровне шума в 50% точность с ростом радиуса стремится к 100%. Например, точность достигает 100% при R = 10.9% - 59.4% от 256-ти точечного диапазона признаков. ([3]).

Таким образом, при наличии обратных образов $\{n\}_{x_f,f}$, нахождение решения уравнения (1) – это процедура линейного порядка сложности. Заметим, что при нахождении обратных образов в процессе обучения арифметические операции не используются. В результате обучение индексной нейронной сети – это, практически, мгновенный процесс. Например, данные, содержащие 400 профилей экспрессии генов, где каждый профиль представлен 20531 числами, показывающими активность 20531 генов (~ 8Мбайт), были обработаны с использованием одной графической карты (Nvidia GPU) в течение 0.075 секунд (при обучении) и позволили достичь почти 100%

диагностической точности на 400 тестовых полных профилях активности генов ([4]). Другим примером является прогнозирование реального срока службы реактивных двигателей ([6]), которое было предпринято с использованием набора данных NASA [7]. Было обнаружено, что индексная нейронная сеть является единственным предиктором, который показал ноль критических ошибок (отсутствие поздних предупреждений). Еще одним примером является время обучения, равное 0.00046 секунд, которое было достигнуто на 581012 образах из набора данных CoverType [8] (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Некоторые экспериментальные результаты

Наборы данных	Прогноз отказов авиадвигателей	Определение типа поверхности
Образы x признаки	33,827 x 26	581,012 x 54
Обучение (сек)	0.5* / нет данных **	0.00046* / 30**
Ошибки (%)	0* / 28**(ложные предупреждения)	10* / 4**

*Индекстрон (Nvidia GTX 1660, 8-core CPU) , ** [6]

** [9], CudaTree (4 GPU Nvidia GTX – 690, 8-core CPU)

IV. Заключение

1) Многоуровневые сети, где выходные данные предыдущего уровня служат входными данными следующего уровня, еще больше расширяют возможности индексных нейронных сетей. Например, классификация динамических сцен может быть достигнута путем классификации пикселей, за которой следует классификация локальных областей, за которой следует классификация объектов изображения, за которой следует классификация движений. Классификации всех уровней происходят без учителя.

2) Обучение без учителя равнозначно кластеризации, где количество кластеров можно контролировать радиусом обобщения.

3) Известно, что чат-боты искусственного интеллекта (например, ChatGPT) используют механизм внимания в качестве основы своих архитектур. Переход от векторных характеристик слов (word embeddings) к характеристикам слов на основе контекста в котором они встречаются позволяет реализовать механизм внимания на основе индексации, тем самым делая избыточным использование огромного количества настраиваемых коэффициентов и, тем самым, значительно снижая вычислительную сложность обучения систем искусственного интеллекта.

Литература

[1] *M. Gupta.* “Google tensor is a milestone for machine learning”, 2024. *https://blog.google/products/pixel/introducing-google-tensor/*

[2] Nobel Prize in Physics. (2024). *https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2024/popular-information/*

[3] *A. Mikhailov, M. Karavay*. “On Function of the cortical column and its significance for machine learning”. *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2024, Rome-Italy)*, pp. 461-468.

[4] *A. Mikhailov et all*. “Machine learning for diagnosis of diseases with complete gene expression profile”. *In Automation and Remote Control.* (2023). vol. 84, # 7. C. 763 – 770

[5] *T. Standish*. “Data structures, algorithms, and software principles”. *Addison-Wesley Publishing Company*, Inc. 1994. ISBN 0-201-52880-0.

[6] *A. Mikhailov , et all*. “Inverse sets in big data processing”. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Applications of Information and Communication Technologies*. (2017), vol.1

[7] *https://c3.nasa.gov/dashlink/resources/139/*

[8] https://archive.ics.uci.edu/dataset/31/covertype

[9] *D. Cheng, F. Canny*. “Optimizing Random Forests on GPU”. Technical Report No. UCB/EECS-2014-205. *http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2014/EECS-2014-205.html*

Распределенные вычисления в неблокируемых системных сетях

В. С. Подлазов
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
podlazov@ipu.ru, podlazov@gmail.com

***Аннотация**. Рассмотрены неблокируемые оптоэлектронные сети, в которых выполняются групповые операции над множеством чисел за время передачи одного числа. Рассмотрено выполнение групповые операций исполнительными фотонными блоками, размещенными при каждом абоненте сети, и рассмотрена схемотехника этих блоков. Рассмотрена возможность выполнения групповых операции в циклических последовательностях узлов, задаваемых гамильтоновыми графами. Рассмотрены процедуры построения этих циклических последовательностей и выполнения в них групповых операций. Рассмотрена возможность построения неблокируемой электронной системной сети на любое число абонентов. Рассмотрена возможность построения оптоэлектронной сети как тандемной сети, в которой оптоэлектронные переключатели управляются их аналогами из электронной сети.*

I. Введение

В настоящее время развиваются вычислительные системы на основе системных сетей, в которых данные передаются вместе с командами, образую spatial data flow структуры [1]. Их частным случаем являются системы с распределенной параллельной обработкой данных в процессе их передачи по сети, в которых выполняется групповая операция над множеством чисел, передаваемых параллельно, за время передачи по общему каналу сети одного числа, формирующегося результата операции. Такие операции называются «Вычисления в общем канале» (ВОК) [2] и они могут выполняться в прямых каналах без буферизации промежуточных значений («на лету»). Простейшими примерами операций ВОК являются суммирование множества чисел из разных узлов или нахождение из них максимального числа.

Операции ВОК можно выполнять в циклических последовательностях сетевых узлов, образующих гамильтоновы графы. При этом операции ВОК на непересекающихся графах могут выполняться параллельно. При каждом узле сети необходимо иметь исполнительные блоки для разных операций ВОК. Их можно строить в элементной базе разветвителей оптических каналов в чисто фотонной реализации (без электронного управления блоками) [3]. Здесь предполагается, во-первых, что сетевые узлы имеют возможность передавать/принимать данные в/из исполнительных блоков оптическими сигналами максимально возможной частоты и, во-вторых, что исполнительные блоки работают только с этими оптическими сигналами. Исполнительные блоки позволяют выполнять арифметические и логические операции над числами, представленными оптическими сигналами, без использования специальных фотонных АЛУ.

Циклические последовательности узлов с прямыми каналами можно строить в неблокируемых системных сетях, которые являются бесконфликтными на произвольных перестановках пакетов между узлами. В элементной базе коммутаторов и разветвителей каналов (мультиплексоров/демультиплексоров) можно строить неблокируемые сети с прямыми каналами любого размера по числу абонентов сети [4, 5].

На основе вышеперечисленных свойств в работе ставится задача разработать методику построения неблокируемой системной сети, которая обладает возможностью выполнения операций ВОК на произвольном множестве узлов «на лету» при фотонной реализации исполнительных блоков.

В разделе 1 рассматривается методика построения фотонных исполнительных блоков ВОК и предлагается схемотехника их реализации. В разделе 2 рассматривается методика построения

гамильтоновых графов в неблокируемых системных сетях с прямыми каналами и способ встраивания в них исполнительных узлов ВОК. В разделе 3 рассматривается методика построений неблокируемых оптоэлектронных сетей на основе интерферометров Маха-Зандера, как базы для применения фотонных исполнительных блоков.

II. Распределенная арифметика на основе фотонных коммутаторов

Для выполнения операций ВОК логические переменные передаются по каналу в парафазном виде, т.е. по двум линиям 0 и 1. Значение 0 передается сигналом в линии 0 при отсутствии сигнала в линии 1, а значение 1 – сигналом в линии 1 при отсутствии сигнала в лини 0. Линии 0 и 1 проходят через конвертор-коммутатор C_i каждого i-го узла сети. Он выполняет унарную операцию O_i преобразования входной логической переменной x_i в выходную логическую переменную $y_i = O_i x_i$.

Операция O_i состоит из следующих преобразований: повторения $y_i = x_i$ («=»), отрицания $y_i = \neg x_i$(«¬»), перевода в значение $y_i = 0$ («0») и перевода в значение $y_i = 1$ («1»).

Конвертор используется в фиксированных состояниях, т.е. операция O_i в каждом из них считается выполненной, и он в каждом состоянии представляет собой некоторую конфигурацию пары отрезков ВОЛС. Пары таких состояний задаются парафазной управляющей переменной u_i.

На рис. 1 представлена схемы использования таких пара конверторов для реализация некоторых логических функций на фотонных демультиплексорах (D) и мультиплексорах (M) для парафазных переменных x, u и y. Для этих схем в дальнейшем используются обозначения, приведенные на рис. 1 снизу.

На рис. 1 используются фотонные демультиплексор D 1×2 и мультиплексор M 2×1, собираемые из нескольких слоев пленок метаматериалов с электрооптическими или магнитооптическими свойствами [6, 7]. Особенность их применения состоит в том, что для управления коммутацией используется оптический сигнал. В демультиплексоре они преобразуются в 2 внутренних электрических или магнитных управляющих сигнала, которые подаются на управляющий слой, который задает два направления распространения информационного сигнала, поступившего на его оптический вход. В результате входной оптический сигнал направляется на один из 2-х оптических выходов.

У нас имеется одна управляющая парафазная переменная, поэтому можно использовать другие однослойные устройства на 2 выхода (демультиплексор) или входа (мультиплексор), например пленки арсенида галлия [8]. Они позволяют строить фотонные логические элементы, управляемые светом напрямую.

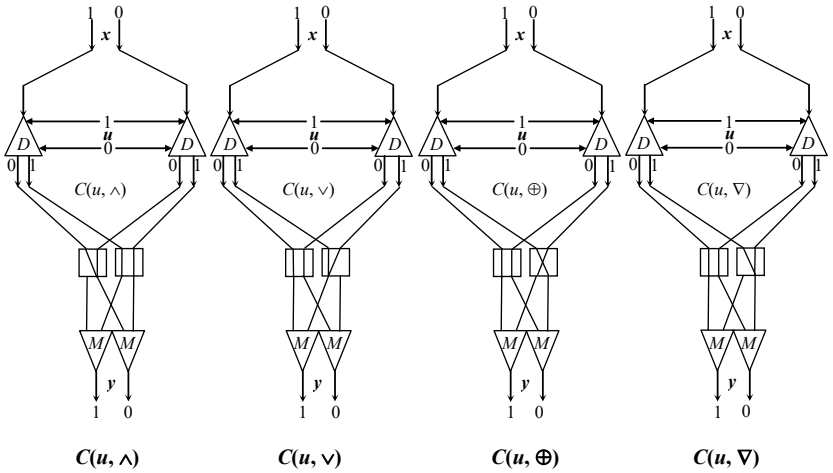


Рис. 1. Схемная реализация логических функций из табл. 1 для парафазных переменных

В табл. 1 приводятся таблицы истинности логических операций, используемых в схемах на рис. 1. Видно, что операция $\curlywedge$ задается только парой состояний конвертора C_i, которые выбираются по

значению переменной u_i. Как результат, на паре конверторов можно выполнить бинарную операцию $y_i = x_i \aleph u_i$ – любую из 16 логических операций.

Таблица 1. Логические функции по состояниям конвертора для «сумматора»

Функция «И»				Функция «ИЛИ»				«Сложение по *mod*2»				«Начальный запуск»			
$\aleph = \wedge$				$\aleph = \vee$				$\aleph = \oplus$				$\aleph = \nabla$			
x	u	O	y	x	u	O	y	x	u	O	y	x	u	O	y
0	*0*	«0»	0	0	*0*	«=»	0	0	*0*	«=»	0	0	*0*	«=»	0
0	*1*	«=»	0	0	*1*	«1»	1	0	*1*	«¬»	1	0	*1*	«0»	0
1	*0*	«0»	0	1	*0*	«=»	1	1	*0*	«=»	1	1	*0*	«=»	1
1	*1*	«=»	1	1	*1*	«1»	1	1	*1*	«¬»	0	1	*1*	«0»	0

На рис. 2 представлена также схемная реализация для парафазных переменных мультиплексора (M_u) и демультиплексора (D_u), управляемых переменной u.

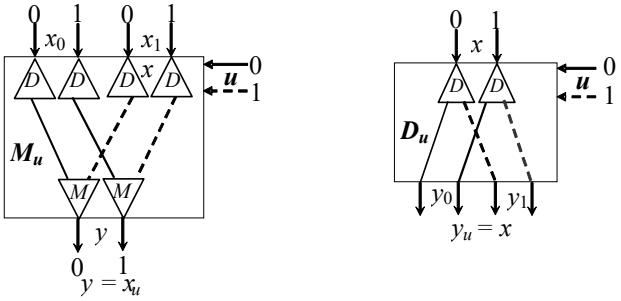


Рис. 2. Схемная реализация мультиплексора и демультиплексора для парафазных переменных

При последовательном размещении узлов можно за время передачи по общему каналу одного числа образовать в нем сумму размещенных по узлам чисел или выделить из них максимальное число. Для этого числа передаются как двоичные числа последовательно по разрядам. Для суммирования они передаются младшими разрядами вперед, а для нахождения максимума – старшими разрядами.

В дальнейшем считается, что узлы размещаются в циклических последовательностях гамильтоновых графов. В каждой из них выделяется исходный 1-ый узел, с которого начинается их построение (см. следующую главу), и который выдает команду выполняемой операции ВОК. Эта команда последовательно синхронизирует для всех узлов начало выполнения распределенной операции r. При каждом узле имеется набор исполнительных блоков $U(r)$, заточенных на выполнение отдельных операции ВОК. Команда операции выбирает конкретный исполнительный блок. Каждый исполнительный блок состоит из схем, выполняющих необходимые логические операции в определенной последовательности, заданной их межсоединениями.

На рис. 4 представлены блоки $U_2(1)$ и $U_N(1)$ при 2-м и N-м узлах циклической последовательности, выполняющих операцию суммирования N чисел. Исходный 1-й узел сети не использует свой блок $U_1(1)$. Он выдает по парафазной линии значений слот X_1, содержащий двоичное многоразрядное число, начиная с младших разрядов, а по парафазной синхролинии – слот S той же разрядности. В слоте X_1 разряды передается переменными $x_1{}^i$, а в слоте S – переменными s^i, где i – это номер разряда. Первый разряд слота S имеет значение 1 ($s^1 = 1$), а остальные его разряды – значения 0 ($s^i = 0$ при $i > 1$). Точки на линиях обозначают узлы разделения световых сигналов

посредством ветвления оптических линий. Блок $U_2(1)$ распределенного сумматора подсоединяется к 1-му и 2-му сетевым узлам.

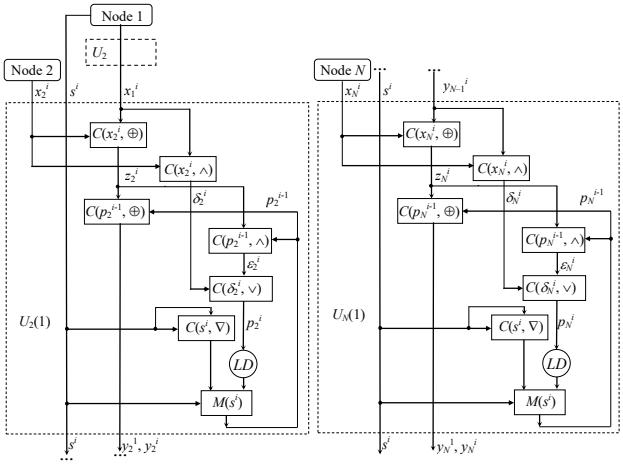


Рис. 4. *N*-узловой распределенный сумматор

Наряду с рассмотренной выше операцией ВОК «суммирование» 1-й узел может задавать и операцию «максимизация», по которой находится наибольшее число из чисел, размещенных в узлах сети. По этой команде от исходного узла при каждом следующем узле выбирается исполнительный блок $U(2)$ – «максимизатор», выполняющий эту операцию. Схема такого распределенного – «максимизатора» представлена на рис. 6.

В блоках $U(2)$ дополнительно используются схемы, которые выполняют логические функции, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Логические функции для «максимизатора»

Логическая функция «Переключение»				Логическая функция «Повторение»			
$\Lambda = \varnothing$				$\Lambda = \# = \wedge$			
x_{k-1}	x_k	O	$z_{(k-1)}$	z_{k-1}	$\delta_{(k-1)}$	O	$\delta_{\#(k-1)}$
0	*0*	“1”	1	0	*0*	“0”	0
0	*1*	“=”	0	0	*1*	“=”	0
1	*0*	“1”	1	1	*0*	“0”	0
1	*1*	“=”	1	1	*1*	“=”	1

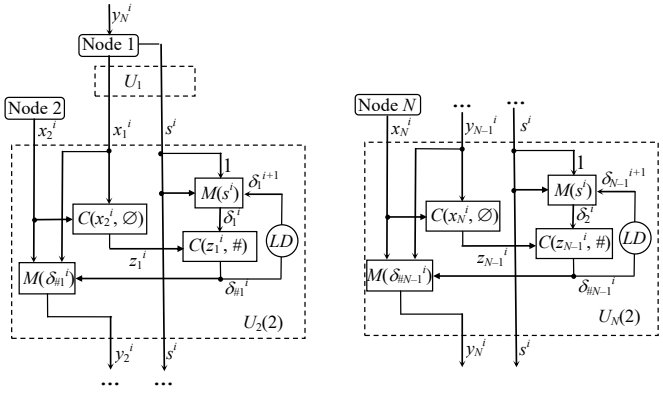


Рис. 6. *N*-узловой распределенный «максимизатор»

III. Гамильтоновы циклы в неблокируемых системных сетях

В главе 2 представляются неблокируемые системные сети как коммутаторы с наибольшим быстродействием и большой сложности.

IV. Неблокируемые системные сети из оптоэлектронных переключателей на базе интерферометров Маха-Зандера

Оптическую сеть для ВОК можно построить из оптоэлектронных переключателей на базе интерферометров Маха-Зандера (MZI) [10, 11]. Обычный переключатель MZI 2×2 на основе электрооптических свойств (пассивная структура EO-MZI) состоит из двух интерферометрических плеч равной длины, соединенных между двумя ответвителями.

Неблокируемую оптическую сеть можно создать на основе тандемных коммутирующих устройств, состоящих из аналогичных электронных и оптоэлектронных компонент. Первые участвуют в прокладке и фиксации маршрутов, и задают конфигурацию вторых. Тандемные коммутирующие устройства должны иметь идентичную конфигурацию и работать в режиме master(электроника)-slave(оптика). Таким образов создается тандемная неблокируемая сеть, состоящая из копий электронной и оптоэлектронной сетей. На входах/выходах второй сети можно разместить фотонные исполнительные узлы (глава 1) для выполнения операций ВОК с б***о***льшим быстродействием и с б***о***льшей помехозащищенностью.

V. Заключение

Рассмотрена методика и схемотехника построения неблокируемых системных сетей, обеспечивающих выполнения распределенных групповых операций в гамильтоновых циклах сетевых узлов. Групповые операции выполняются как операции вычислений в общем прямом канале (ВОК) с наибольшим быстродействием. Системные сети могут иметь электронную и оптоэлектронную (тандемную) реализацию. Исполнительные блоки выполнения операций ВОК могут иметь как электронную, так и фотонную реализацию.

Литература

[1] *Абрамов С.М., Степаненко С.А.* О подходах к разработке программного обеспечения для фотонной вычислительной машины // URL: *https://2022.nscf.ru/video/video-nscf-2022-plenarnye-doklady.*

[2] *Прангишвили И.В., Подлазов В.С., Стецюра Г.Г.* Локальные микропроцессорные вычислительные сети. Глава шестая. – *М.: Наука*, 1984. – 175 с.

[3] *Подлазов В.С.* Распределенная арифметика в общем канале на основе фотонных коммутаторов // *Труды 14-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024)*. Москва: ИПУ РАН. 2024. С. 2541-2546.

[4] *Подлазов В.С.* Самомаршрутизируемая неблокируемая системная сеть с прямыми каналами: сложность и быстродействие. // *Программные системы: теория и приложения*. – 2022. – 13. – №4(55). – С. 47–76.

[5] *Подлазов В.С.* Разные неблокируемые самомаршрутизируемые системные сети с прямыми каналами // *Программные системы: теория и приложения*. – 2023. – 14. №3(58).– С. 115–138.

[6] *K. Vytovtov, E. Barabanova, S. Zouhdi*. Optical Switching Cell Based On Metamaterials And Ferrite Films // *12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena. Metamaterials 2018*. Espoo, Finland, Aug.-Sept. 2018. P. 424–426.

[7] *E.A. Barabanova, K.A. Vytovtov and T.T. Nguyen* The control system elements of the new generation optical switching cell // *Journal of Physics: Conference Series* 1368 (2019) 022002 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1368/2/022002.

[8] *M.R. Shcherbakov, Sheng Liu, et al.* Ultrafast all-optical tuning of direct-gap semiconductor metasurfaces // *http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-00019-3.*

Мониторинг прибрежной зоны на основе классификации движения водного транспорта для повышения безопасности на воде

Т. Я. Гладких, А. В. Графенков, К. Д. Русаков
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
golnikt@yandex.ru, grafenkov@yandex.ru, rusakov_msk@yandex.ru

Аннотация. *В работе представлена система видеоаналитики, предназначенная для повышения безопасности купающихся в прибрежной зоне за счёт автоматического мониторинга водного транспорта. Предлагаемый метод использует сегментационную нейросеть YOLO-v11-seg для одновременного выделения корпуса судна и прогноза кильватерного следа, а также трекер StrongSORT для анализа движения объектов. Классификация судов осуществляется по бинарному признаку «движется / не движется» с учётом пространственного смещения и наличия следа на воде. При приближении движущегося объекта к виртуальной границе зоны купания система формирует тревожное событие и уведомляет спасателей в режиме реального времени. Эксперименты на видеоданных показали высокую точность сегментации (mAP:IoU:50 = 93 %) и F1-мера классификации движения = 0,98. Разработанный подход позволяет оперативно обнаруживать потенциально опасные ситуации, снижая нагрузку на персонал и повышая общий уровень безопасности на пляже.*

I. Введение

Суда, несанкционированно входящие в зоны купания, ежегодно становятся причиной травм и гибели людей [1]. Автоматизация визуального контроля с камер, установленных на спасательных вышках и бортах БПЛА, позволяет устранить «слепые зоны» наблюдения и ускоряет реакцию спасателей. Первые коммерческие решения такого рода уже внедрены, например, в израильском сервисе SightBit [2] и венетийской системе ARGOS [3]. Академические работы также демонстрируют потенциал компьютерного зрения для задач обеспечения безопасности на воде: в работе [7] представили архитектуру Vision Transformer для распознавания утопающих в прибрежной акватории, а авторы в [8] показали эффективность каскадного подхода с YOLO и ViT для обнаружения людей, находящихся в опасности. Тем не менее существующие системы либо решают узкоспециализированные задачи (распознавание утопающих), либо фиксируют лишь факт присутствия судна без оценки его динамики. Между тем именно движение плавсредства в зоне купания является первичным индикатором угрозы для пловцов. Настоящая работа восполняет этот пробел, предлагая метод классификации водного транспорта на «движется / не движется» и механизм оперативного оповещения спасателей о потенциально опасных ситуациях.

II. Основная часть

Для автоматического мониторинга мы использовали сегментационную нейросеть YOLO-v11-seg, дообученную на 6 200 размеченных изображениях прибрежной акватории. Модель одновременно выделяет маску корпуса судна и предсказывает кильватерный след, что упрощает последующую оценку динамики. По итогам теста на валидационном наборе модель достигла mAP = 93 % для масок судов и кильватеров при пороге IoU = 0,5.

После сегментации объекты передаются в модуль трекинга StrongSORT [9], который формирует непрерывные траектории центроидов. Судно считается движущимся, если за 1 с его среднее смещение превышает 0,15 % ширины кадра либо обнаружен устойчивый кильватер — вытянутая высокотекстурная область позади кормы. Для интеграции признаков трек-скорости и вероятности наличия кильватера рассчитывается сводный балл; при значении > 0,6 объект относят к классу «движется», иначе — «не движется».

В кадре задаётся виртуальный полигон зоны купания. Как только движущееся судно пересекает эту границу либо приближается ближе чем на 10 м, система формирует тревожное событие и немедленно отправляет push-уведомление на планшет спасателя.

Таблица 1. Тестовые метрики

Метрика	Значение
mAP:IoU:50 масок судов / кильватеров	93 %
F1-мера для классификации движения	0,98
Precision / Recall для классификации движения	0,97 / 0,99

Таким образом, алгоритм обеспечивает высокую точность выделения объектов и практически безошибочно различает движущиеся и неподвижные суда, что позволяет спасателям получать своевременные сигналы об угрозе и оперативно реагировать на нарушения.

III. Заключение

Предложенный подход демонстрирует, что даже двоичная классификация «движется / не движется» достаточна для выделения действительно опасных ситуаций. Система уменьшает нагрузку на спасателей и позволяет предупредить купающихся за несколько секунд до возможного столкновения. Дальнейшие работы включают учёт погодных факторов и детализацию типов судов.

Литература

[1] «United States Coast Guard. Recreational boating statistics 2023: 65th annual report», Washington, D.C.: U.S. Dept. of Homeland Security, 2024, 84p.

[2] *Leichman A. K.* «Israel pilots AI lifeguard tech for safer beaches», [Электронный ресурс] Israel21c, 21.06.2020. URL: *https://www.israel21c.org/israel-pilots-ai-lifeguard-tech-for-safer-beaches/* (дата обращения: 12.06.2025).

[3] *Bloisi D. D., Iocchi L.* «Argos — a video surveillance system for boat traffic monitoring in Venice», *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2009, Vol. 23, № 7. pp. 1477–1502, DOI: 10.1142/S0218001409008142.

[4] *Wang Q. A* «YOLOv7-based method for ship detection in videos of drones», Journal of Marine Science and Engineering, 2024, Vol. 12, № 7, Art. 1180, DOI: 10.3390/jmse12071180.

[5] *De Silva A., Mori I., Dusek G., Davis J., Pang A.* «Automated rip current detection with region-based convolutional neural networks», Coastal Engineering, 2021, Vol. 166, Art. 103859, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2021.103859.

[6] *Prasad D. K., Rajan D., Rachmawati L., Rajabally E., Quek C.* «Video processing from electro-optical sensors for object detection and tracking in a maritime environment: a survey» , *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, Vol. 18, № 8, pp. 1993–2016, DOI: 10.1109/TITS.2017.2682288.

[7] *Русаков К.Д.* «Подход к распознаванию утопающих с помощью глубокого обучения» *Труды 16-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2023, Волгоград)*, Волгоград: ВГТУ, 2023, №1, с. 257-259.

[8] *Гладких Т.Я., Русаков К.Д., Графенков А.В., Мигачев А.Н., Мостаков Н.А., Голобурдин Н.В.* «Drowning Detection Algorithm in Coastal Zones» *Proceedings of 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023)*, Астрахань: IEEE, 2023.

[9] *Du Y., Zhao Z., Song Y., Zhao Y., Su F., Gong T., Meng H.* «StrongSORT: Make DeepSORT Great Again» [Электронный ресурс], *arXiv preprint*, 2023, № arXiv:2202.13514.

Study of recurrent super-resolution algorithm in low element antenna array

V. N. Ratushnyak, D. D. Dmitriev, I. V. Tyapkin, A. B. Gladyshev
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
oborona-81@yandex.ru, ddmitriev@sfu-kras.ru,
aronakss@yandex.ru, a-glonass@yandex.ru

***Abstract**. Today, the rapid development of UAVs determines the need to solve navigation problems when using them in groups. As an alternative to existing onboard navigation tools, the article proposes the use of onboard direction finders based on low-element antenna arrays that provide measurement of angular coordinates of UAVs among themselves in a group. A recurrent super-resolution algorithm in low-element antenna arrays is synthesized, providing sufficient characteristics of the accuracy of bearing determination and resolution. The algorithm is simulated, showing its effectiveness.*

I. Introduction

Currently, there is an explosive growth of the unmanned systems market. This is due to the stable trend of development and active use of unmanned technologies in various fields of activity. In addition, the use of UAVs in the composition of organized groups is actively developing, which allows you to get a synergistic effect – simultaneous coverage of a large area, distribution of goals between group members, distribution of tasks, etc. To ensure the group flight of UAVs in various conditions, regardless of the area, climate, time of day and year, the introduction of more effective means of their navigation and management is required. These funds should ensure trajectory safety when performing a group flight of UAVs, maintaining the construction and regrouping if necessary. In addition, the legislator also determines the need to use high-precision navigation funds of the UAV. Modern onboard navigation systems based on GNSS-receivers do not provide sufficient to perform a group flight of the accuracy of measuring UAV coordinates. To ensure mutual navigation of the UAV when performing a group flight as an alternative or supplement to existing onboard navigation systems, it is possible to propose the use of onboard radiors with low-element antenna lattices. They allow you to determine with high accuracy mutual bearing (corner coordinates) of UAVs in the group. An individual onboard number of UAVs in the group can be determined by the structure of the emitted signal. To ensure mutual navigation of UAVs during group flights, as an alternative or supplement to existing onboard navigation systems, it is possible to propose the use of onboard direction finders with low-element antenna arrays. They allow determining mutual bearings (angular coordinates) of UAVs in a group with high accuracy. In addition, important advantages of antenna arrays are the capabilities for space-time signal processing, adaptation to interference, and implementation of algorithms for angular super-resolution of signal sources [1–6].

The concept of such systems is to determine the coordinates of UAVs in a group using the bearings between the master and slave. The signals used are code division signals, allowing for the exchange of service information and data, recognition and determination of the location of each UAV in the group. Traditionally, for direction finding purposes, scanning of the space by the directional pattern in antenna arrays is carried out electronically by controlling the values of complex weighting coefficients on the antenna elements (amplitude-phase distribution of the antenna array) [3–7]. In this case, when using amplitude direction finding, the value of the angular resolution of the radiation sources is determined by the Rayleigh limit, which does not allow the use of low-element antenna arrays for high-precision direction finding purposes, and the placement of antenna arrays with a large number of antenna elements on UAVs causes serious difficulties. However, in coherent and correlation reception, it is possible to use super-resolution algorithms to estimate the angular coordinates of the signal source. These algorithms allow achieving high accuracy even in low-element antenna arrays with relatively low computational complexity [6]. The accuracy of determining the bearing depends on the antenna array configuration, the methods for

calculating the correlation matrix, the signal-to-noise ratio, the identity of the amplitude-frequency characteristics of the receiving channels, and the calculation algorithm, which ultimately determine the spatial direction-finding relief.

The use of low-element antenna arrays in combination with super-resolution algorithms for estimating the angular coordinates of UAVs in a group is an undeniable advantage, since it does not require significant computational costs and does not significantly increase the weight, dimensions, and energy consumption of onboard equipment.

II. Recursive super-resolution algorithm

In the case of *M*-channel phase measurement, the potential root-mean-square error of regular direction finding in antenna arrays is inversely proportional to the signal-to-noise ratio and the normalized effective antenna aperture length [8]. Increasing the accuracy of direction finding is possible by increasing the number of elements in the antenna array, but this increases its dimensions and complicates the design. As a result, super-resolution algorithms based on adaptation in antenna arrays come to the fore. Calculating the weight vector of spatial processing $\dot{\mathbf{R}}$, involves preliminary formation of the weight vector [9]:

$$\dot{\mathbf{R}} = \dot{\Phi}^{-1}\dot{\mathbf{X}}, \tag{1}$$

where $\dot{\mathbf{\Phi}}^{-1}$ is the estimated inverse correlation matrix of the additive mixture of interference and signal; $\mathbf{X}$ is the vector of complex signal amplitudes received by the antenna array elements.

The expression for the super-resolution algorithm in the measuring channels will be:

$$Y(t) = (\mathbf{X}^T\mathbf{R})^{-1} = (\mathbf{X}^T\frac{1}{C}\Phi^{-1}\mathrm{X})^{-1} \tag{2}$$

This expression in the physical sense is the direction-finding relief of signal sources in the antenna array, and the most complex in it is the inversion of the correlation matrix. To reduce the computational complexity of the algorithm, it is possible to propose the use of recurrent methods. They are based on the recurrent inversion of the matrix during direct calculation of weight coefficients. To synthesize the recurrent equivalent of algorithms (1) and (2), we define the current estimate of the correlation matrix for (l + 1) adaptation steps [4]:

$$\dot{\Phi}_{l+1} = \frac{l}{l+1}\left(\dot{\Phi}_l + \frac{1}{2l}\dot{\mathbf{X}}_{l+1}\dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\right) \tag{3}$$

Using Dwyer's rule [5, 10] and taking into account that $\dot{\mathbf{R}} = \dot{\mathbf{X}}\dot{\mathbf{X}}^{*T}$, we obtain the desired recurrent algorithm for inverting the correlation matrix:

$$\dot{\Phi}^{-1}_{l+1} = \frac{l+1}{l}\left[\dot{\Phi}^{-1}_l + \frac{\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}\dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\dot{\Phi}^{-1}_l}{2l + \dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}}\right] \tag{4}$$

A recurrent formula for estimating the weight vector directly can be obtained by multiplying the estimate (4) by the vector of the expected spatial signal:

$$\mathbf{R}_{l+1} = \frac{l+1}{l}\left[\mathbf{R}_l + \frac{\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}X^*_{\Sigma l}}{2l + \dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}}\right] \tag{5}$$

where $X^*_{\Sigma l} = X^*_{l+1}R_l$ is the complex conjugate value of the complex amplitude of the output voltage of the spatial processing device.

Then the output signal at the output of the adaptive system will be determined by the following expression [8]:

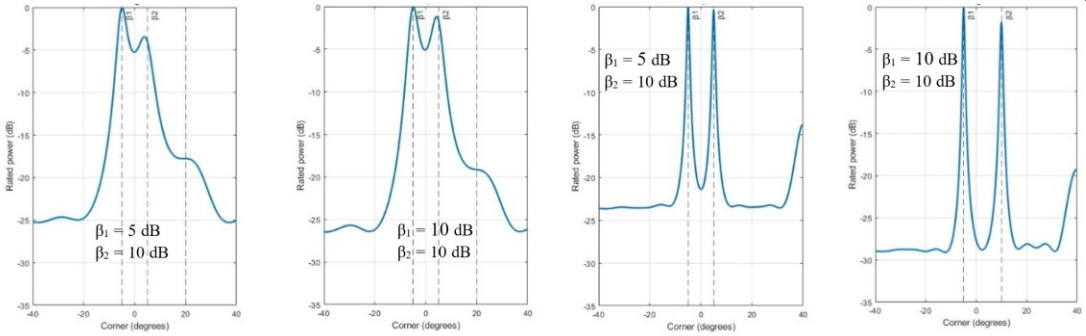
$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Y}} = (\dot{\mathbf{X}}^T_l\dot{\mathbf{R}}_l)^{-1} = (\dot{\mathbf{X}}^T_l\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_l)^{-1}, \\ \dot{\Phi}^{-1}_{l+1} = \dfrac{l+1}{l}\left[\dot{\Phi}^{-1}_l + \dfrac{\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}\dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\dot{\Phi}^{-1}_l}{2l + \dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}}\right], \\ \dot{\mathbf{R}}_{l+1} = \dfrac{l+1}{l}\left[\dot{\mathbf{R}}_l + \dfrac{\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}\dot{X}^*_{\Sigma l}}{2l + \dot{\mathbf{X}}^{*T}_{l+1}\dot{\Phi}^{-1}_l\dot{\mathbf{X}}_{l+1}}\right]. \end{cases} \tag{6}$$

Thus, an analytical expression for calculating the weight vector, which is the direction-finding relief of the antenna array, is obtained. According to (7), the procedure for determining the direction-finding relief consists of sequentially, according to input signals, calculating the inverse correlation matrix and then scanning the space from the initial to the final direction by changing the vector **X** and the corresponding calculation of the value $Y(t)$.

III. Modeling of a recurrent super-resolution algorithm in a low-element antenna array

Modeling of the synthesized recurrent super-resolution algorithm in a low-element antenna array was performed in the Matlab environment. During the modeling, the dependence of the direction-finding characteristics on the number of antenna array elements, the signal-to-noise ratio, and the angular position of the signals being directed was studied. The model does not take into account the mutual influence of the antenna array elements, differences in the amplitude-phase characteristics of the receiving channels, and other hardware errors.

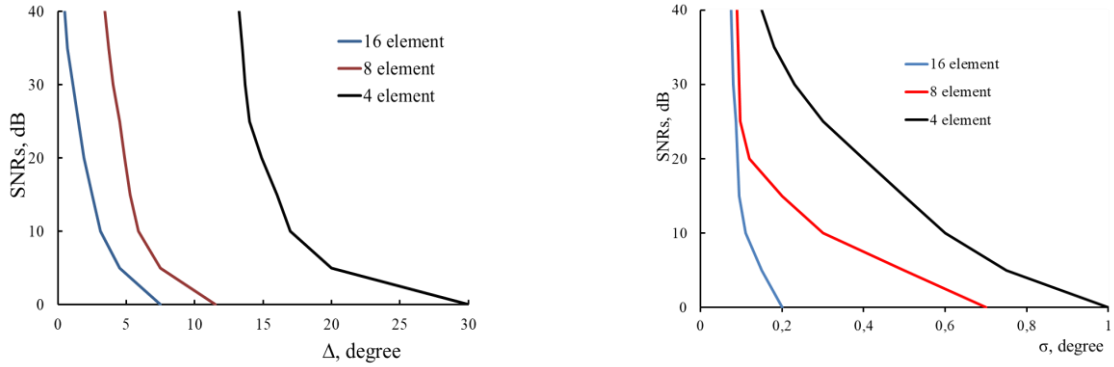
Figure 1 shows the direction-finding reliefs of 8- and 16-element antenna arrays under the influence of two signal sources with angular positions β_1 and β_2, obtained using a recurrent super-resolution algorithm.



a) *b*) *c*) *d*)

Fig. 1. Direction-finding relief: *a*, *b* – 8-element antenna array $\beta_1 = -5°$, $\beta_2 = 5°$; *c*, *d* – 16-element antenna array; *c* – $\beta_1 = -5°$, $\beta_2 = 5°$; *d* – $\beta_1 = -5°$, $\beta_2 = 10°$

During the simulation, an assessment was made of the standard deviation of the measurement of the angular coordinate of the signal source and the resolution by the angular coordinate depending on the signal-to-noise ratio and the number of elements of the antenna array (Fig. 2).



a) *b*)

Fig. 2. Dependence of the standard deviation of the measurement of the angular coordinate of the signal source (*a*) and the resolution by the angular coordinate (*b*) on the signal-to-noise ratio

Thus, it is evident from the figures that the accuracy of bearing estimation by methods using super-resolution algorithms has a strong dependence on the value of the signal-to-noise ratio of signal sources, the angular distance between them and the number of elements of the antenna array. These features are

important to consider in onboard navigation systems of UAVs based on angular measurement methods of mutual navigation.

IV. Conclusion

The analysis of the simulation results confirms the efficiency of the synthesized recurrent super-resolution algorithm. The developed algorithm has a practical implementation in low-element antenna arrays used in UAVs. Its implementation in onboard navigation systems contributes to a significant reduction in the measurement error of angular coordinates of neighboring UAVs operating in an organized group, with a slight increase in hardware resource requirements.

Acknowledgments

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-19-20070, https://rscf.ru/project/25-19-20070/, and a grant from the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

References

[1] *V.A. Sergeev*, "Testing the Hypothesis of a Plane Wavefront of a Signal Received by a Multi-Element Antenna Array", *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2022.

[2] *Ya. Kichko*, "Problems and Prospects for the Development of Group Application of Unmanned Aerial Vehicles", *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2022)*, 2022. pp. 565–568.

[3] *V.N. Tyapkin, D.D. Dmitriev, V.N. Ratushnyak, V.G. Konnov*, "Space-Time Processing of Signals in Angle Measurement Navigation Receivers", *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016.

[4] *I.N. Kartsan, V.N. Tyapkin, D.D. Dmitriev, et al.*, "Synthesis of an algorithm for interference immunity", IOP Conf. *Series: Materials Science and Engineering*. 155. 2016.

[5] *M.V. Ratynsky*. Adaptation and super-resolution in antenna arrays. *Moscow. Radio i svyaz*, 2003.

[6] *V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, O.A. Shmonin*, "Angular Resolution of Closely Spaced Signal Sources Using a Two-Dimensional Antenna Array on the Basis of the Minimum-Polynomial Method", *Radiophysics and Quantum Electronics*. 64(3). 2021, pp. 214–227.

[7] *V.N. Tyapkin, I.N. Kartsan, D.D. Dmitriev, A.E. Goncharov*, "Correcting Non-Indentity in Receiving Channels in Interference-Immune Systems for Glonass and GPS", *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016.

[8] *V.N. Tyapkin, D.D. Dmitriev, Yu.L. Fateev, A.N. Fomin*, "Algorithm of Adaptation of the Phased Antenna Arrays Based on Partial Fourier Series and his Application for Direction Finding", *Science Intensive Technologies*, 15(9), 2014, pp. 5–9.

[9] *V.N. Tyapkin, D.D. Dmitriev, V.G. Konnov, A.N. Fomin*, "Method of Determination of Spectrum Factors Vector Due to Likelihood Ratio Criterion", *Vestnik SibGAU*, 3(43), 2012, pp. 76–79.

Разработка метода построения расписания доставки грузов с использованием беспилотных летательных аппаратов

А. В. Галицкая, В. А. Галузин
Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия,
an14215@yandex.ru, vladimir.galuzin@gmail.com

***Аннотация**. В работе рассматривается задача управления беспилотными летательными аппаратами в контексте организации доставки грузов. Предложен подход к планированию логистических операций, основанный на использовании баз знаний и мультиагентных технологий. Основная идея заключается в представлении заказов и ресурсов в виде интеллектуальных агентов, взаимодействующих между собой в процессе кооперации и конкуренции. Распределение задач осуществляется в ходе самоорганизующегося взаимодействия агентов до достижения консенсуса, при котором обеспечивается согласование потребностей и возможностей системы. Конфигурация мультиагентной системы адаптируется под конкретные бизнес-процессы с помощью онтологий, которые формализуют знания о предметной области и обеспечивают гибкость модели. Введение новых параметров или изменение условий может быть реализовано без перепрограммирования, за счёт модификации онтологических моделей. Разработанный подход обеспечивает адаптивность, масштабируемость и устойчивость логистической системы к внешним изменениям. Он особенно актуален для применения в задачах, связанных с динамичным поступлением заказов и ограниченными ресурсами, таких как доставка медицинских препаратов, продуктов питания или коммерческих посылок с использованием БПЛА.*

I. Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в различных отраслях – от нефтегазовой промышленности до аграрного сектора. Основные задачи, решаемые с их помощью, включают мониторинг, обнаружение объектов и выполнение операций в труднодоступных или опасных для человека зонах. Согласно итогам 2024 года, объем производства гражданских БПЛА в России достиг порядка 57 тысяч единиц, что на 23% превышает показатели 2023 года [1].

Одним из перспективных и активно развивающихся направлений является применение БПЛА для доставки грузов. Идея использовать беспилотники для логистики впервые была представлена компанией Amazon в 2013 году, однако на начальном этапе проект столкнулся с правовыми ограничениями и недостаточной рыночной востребованностью [2]. Лишь в 2022 году, после получения необходимой нормативной базы, регистрации патентов и проведения сертификационных испытаний, компания реализовала проект PrimeAir в промышленном масштабе.

Значительных результатов в данной области достигла китайская компания Meituan, ведущая разработки с 2017 года. По состоянию на ноябрь 2023 года в городе Шэньчжэнь с помощью БПЛА было выполнено более 200 тысяч доставок по 20 маршрутам, охватывающим 4 района [3].

На территории России на данный момент отсутствуют функционирующие промышленные системы доставки грузов с использованием БПЛА, однако активно ведутся научные исследования и технологические разработки в этой сфере. Ключевой особенностью данной задачи является необходимость учета воздушных транспортных коридоров при построении маршрутов, а также высокая скорость обработки и планирования новых заказов, что особенно критично при доставке скоропортящихся продуктов. В отличие от традиционных курьерских служб, где доставку осуществляет человек, беспилотники не обладают гибкостью при выборе точек отправления и получения. Для эффективного функционирования беспилотной логистики требуется наличие специально оборудованных площадок для загрузки и постаматов в зонах получения груза.

II. Постановка задачи

Кратко сформулируем постановку задачи планирования, которую можно описать:

- Набором БПЛА $R = \{r_i\}, i = \overline{1, I}$, где I – количество БПЛА. Каждый БПЛА характеризуется грузоподъемностью $capacity_i$, скоростью передвижения $speed_i$, ставкой за пройденный километраж $rate_i$, емкостью аккумулятора $battery_i$. Для БПЛА могут быть указаны интервалы их недоступности.
- Набором заказов $O = \{o_j\}, j = \overline{1, J}$, где J – количество заказов. Каждый заказ характеризуется ценой $cost_j$, весом $weight_j$, точкой загрузки и точкой доставки, ограничением по времени выполнения $t_j = [t_j^{start};\ t_j^{end}]$. Заказы поступают в систему в заранее неизвестные моменты времени.
- Набора техпроцессов (ТП) $P = \{p_n\}, n = \overline{1, N}$, где N – количество ТП. ТП представляет собой последовательность связанных операции $p_n = \{p_{nm}\}, m = \overline{1, M}$, где M – количество операций в n-ом ТП. Для каждой операции заданы требования к БПЛА $req_{nm}^q, q = \overline{1, Q}$, где Q – количество требований для m-ой операции n-ого ТП. Для каждого ТП указан штраф за минуту опоздания от крайнего времени выполнения заказа $penaltyRate_n$.
- Набора точек загрузки и доставки, а также воздушных транспортных коридоров между ними. Каждая точка характеризуется количеством площадок для загрузки/выгрузки, а также минимальным временем ожидания БПЛА в очереди на загрузку/выгрузку. Также движение БПЛА по коридорам в разном направлении осуществляется на разной высоте, чтобы траектории их полета не пересекались.

Необходимо найти для заказов интервалы выполнения операций ТП $T_v = \{t_{vm}\}, t_{vm} = [t_{vm}^{start};\ t_{vm}^{end}], v = \overline{1, V}$, где V – количество запланированных заказов.

При этом требуется обеспечить согласованное планирование поступающих заказов, выявляя и разрешая конфликты с уже ранее запланированными заказами и перераспределяя их между БПЛА с целью повышения эффективности службы доставки.

Целевая функция заказа направлена на получение максимальной прибыли по его выполнению:

$$OF_v = cost_v - salary_v - penalty_v$$

$$salary_v = \sum_{m=1}^{M} rate_i \cdot S_m,$$

$$penalty_v = \begin{cases} 0, \text{если } t_{vM}^{end} \le t_v^{end} \\ penaltyRate_n \cdot \left(t_{vM}^{end} - t_v^{end}\right), \text{иначе,} \end{cases}$$

где $salary_v$ – расходы на оплату труда по выполнению v-ого заказа, $penalty_v$ – штраф за нарушение сроков выполнения v-ого заказа, S_m – пройденный километраж при выполнении m-ой операции v-ого заказа

Задача состоит в том, чтобы разработать метод адаптивного планирования, оптимизации и контроля расписаний доставки груза БПЛА для обеспечения максимальной прибыли компании.

Требуется учесть возможные непредвиденные события недоступности БПЛА, прихода новых или отзыва имеющихся заказов, задержки выполнения заказов, поломки БПЛА и т. д.

III. Предлагаемый подход

В данной работе авторы предлагают подход к адаптивному планированию логистических процессов, основанный на использовании баз знаний и мультиагентных технологий, который является дальнейшим развитием исследований и разработок, продолженных в [4]. Основная идея заключается в построении гибкой, адаптивной модели управления логистическими процессами, в которой взаимодействие между элементами системы осуществляется в форме самоорганизации и консенсуса между интеллектуальными агентами. В качестве концептуальной основы используется онтологическая модель, позволяющая формализовать знания о предметной области и обеспечить их машиночитаемое представление.

В качестве основы используется базовая онтология управления, содержащая фундаментальные сущности: заказ, продукт, задача, ресурс. Эта структура дополняется прикладными онтологиями, в частности, логистической, что позволяет сформировать специализированную онтологическую модель компании.

Для моделирования процессов доставки с участием беспилотных летательных аппаратов введены дополнительные понятия: БПЛА, груз, маршрут, динамическая потребность и возможность. Эти элементы расширяют модель, позволяя учитывать пространственные перемещения, характеристики задействованных ресурсов и влияние внешних факторов (например, потребность в подзарядке).

Процесс планирования осуществляется в рамках модели сети потребностей и возможностей, где агенты обмениваются информацией и координируют свои действия для достижения общих целей. Эта модель позволяет реализовать принципы децентрализованного управления и обеспечивает устойчивость системы к изменениям во входных данных.

Планирование включает четыре последовательные стадии:

1. Подготовка исходных данных – сбор и структурирование информации о заказах, ресурсах и ограничениях;

2. Предварительное планирование без учета конфликтов – начальное распределение задач и маршрутов;

3. Разрешение конфликтов – согласование расписания между агентами до достижения устойчивого состояния системы;

4. Консолидация невыгодных заказов – объединение экономически невыгодных доставок в оптимальные логистические цепочки.

Предложенный подход позволяет гибко адаптировать логистическую систему к изменяющимся условиям, повышая эффективность и устойчивость планирования в контексте использования БПЛА.

IV. Заключение

Описанный подход предоставляет эффективный инструментарий для интеллектуального планирования логистических операций с участием БПЛА, обеспечивая автоматизацию принятия решений и гибкость в условиях разнообразных бизнес-требований и ограничений. В настоящее время разработан прототип системы планирования, который реализует описанный подход, идет подготовка к тестированию на реальных данных и инфраструктуре.

Литература

[1] *А.С. Костин, Н.В. Богатов*, “Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов в России и мире”, Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: *сборник докладов Первой Международной научной конференции. Спб.: ГУАП*, 2020, с. 125-130.

[2] *S. R. R. Singireddy, T. U. Daim*, “Technology roadmap: Drone delivery–amazon prime air”, Infrastructure and Technology Management: Contributions from the Energy, Healthcare and Transportation Sectors. *Cham: Springer International Publishing*, 2018, pp. 387-412.

[3] *X. Dai, X. Xiao, J. Li, H. Shan, X. Jia, Q. Wang*, “Research on Key Factors of Drone Delivery Services Demand”,*3rd International Conference on Bigdata Blockchain and Economy Management (ICBBEM 2024)*, China, 2024.

[4] *А.В. Галицкая, В.А. Галузин*, “Разработка базы знаний для мультиагентной системы планирования логистических процессов”, *XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024)*. М: ИПУ РАН, 2024, с. 2776-2780.

Исследование устойчивости системы связи при воздействии помех с использованием модели СМО с отрицательными заявками

Е. А. Барабанова, А. Д. Корнеев
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
Elizavetaalexb@yandex.ru, anton.korneev.2011@yandex.ru

***Аннотация**. В рамках данной работы рассмотрен переходной режим работы системы массового обслуживания с отрицательными заявками, рассмотрен граф состояний СМО с пуассоновским входным потоком, одним обслуживающим устройством и буфером ограниченного размера. Разработана математическая модель и комплекс программ с использованием языка программирования Python, позволяющий получить численные значения характеристик исследуемой системы, зависящие от конкретных значений входных параметров. Одна программа предоставляет механизмы визуализации графа состояний заданной размерности и системы уравнений Колмогорова в матричном и дифференциальном представлении. Другая программа позволяет находить численные значения вероятностей состояний исследуемой модели, с помощью неё можно определить ключевые характеристики производительности сети: пропускную способность системы, вероятность потери пакетов и время установления стационарного режима.*

I. Введение

Одной из ключевых задач при проектировании и модернизации систем связи является достижение их устойчивости к внешним воздействиям, способным нарушить нормальное функционирование сети. Для оценки устойчивости систем связи предлагается подход, позволяющий по изменению пропускной способности сети, вызванному внешним воздействием, определить уровень ее устойчивости.

Для анализа производительности телекоммуникационных сетей широко применяется математический аппарат теории массового обслуживания [1]. При этом одним из способов описать воздействие различных помех (импульсных подавляющих, спуфинга и т. п.) является модель СМО с отрицательными заявками, понятие которой впервые ввел Е. Геленбе [2].

На данный момент подобные системы изучены в стационарном режиме, но при воздействии помех важно учитывать не только стационарные режимы работы, но и переходные [3]. Это особенно актуально для сетей, отличающихся высокой интенсивностью передачи данных, которые подвержены влиянию атмосферных явлений, промышленных помех и воздействию злоумышленников.

II. Основная часть

В данной работе исследуется переходный режим СМО с отрицательными заявками с применением метода матрицы преобразования вероятностей [3] для графа произвольной размерности с заранее известными интенсивностями поступления отрицательных и положительных заявок λ_1 и λ_2 и интенсивностями обслуживания положительных и отрицательных заявок μ_1 и μ_2 соответственно

Для изучения переходного режима был составлен алгоритм, формирующий граф состояний исследуемой СМО, систему уравнений Колмогорова в дифференциальном виде (рис.1) и матрицу преобразования вероятностей, на основании которой уже получаются численные результаты.

В данном алгоритме p_{00} – состояние, при котором в исследуемой системе 0 положительных и 0 отрицательных заявок как в обработке, так и в буфере. Состояния с первым индексом, отличным от 0 (p_{01}, p_{02} и т. д.) показывают, что в системе находится какое-то количество положительных заявок (1,

2 и т. д.) – одна в обработке, оставшиеся – в буфере. Состояния со вторым индексом отличным от 0 (p_{10}, p_{11}, p_{20} и т. д.) показывают наличие какого-то количества отрицательных заявок (1, 2 и т.д.).

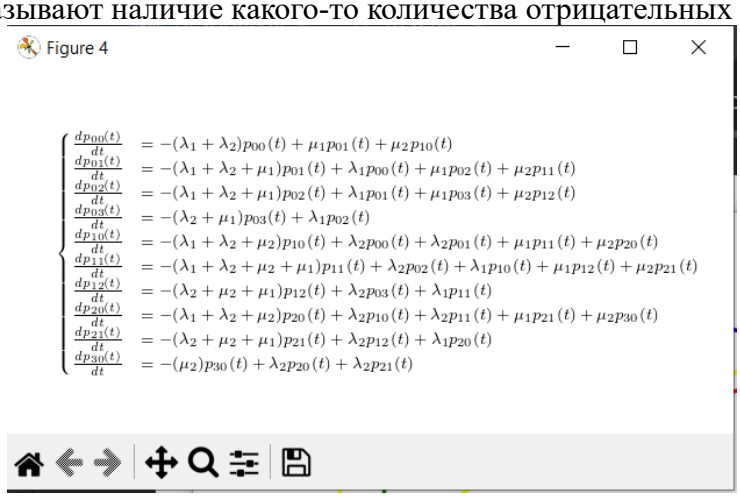


Рис. 1. Визуализация системы уравнений Колмогорова

В ходе работы были получены численные результаты для заданных параметров интенсивностей поступления положительных заявок λ_1=750 Мбит/с и отрицательных заявок λ_2=500 Мбит/с, а также интенсивностей обслуживания положительных μ_1=960 Мбит/с и отрицательных μ_2=530 Мбит/с заявок (см. рис.2).

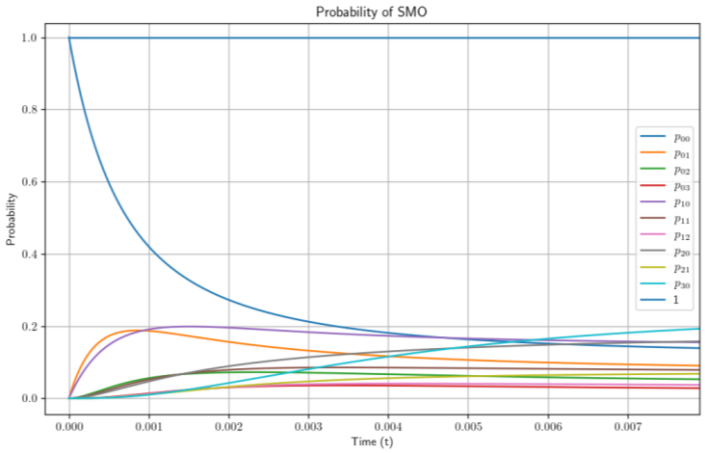


Рис. 2. Вероятности состояний СМО с отрицательными заявками

Анализ показал, что вероятность потери пакетов, оцениваемая как сумма вероятностей заполнения буфера положительными и отрицательными заявками ($p_{\text{пот}}(t) = p_{03} + p_{12} + p_{21} + p_{30}$) остаётся малой как в стационарном режиме, так и в переходном. Например, при значении времени 0.007 секунды, значение вероятности потерь составляет 0.35. Это обусловлено соотношением скорости обслуживания заявок по сравнению с их поступлением. Время, необходимое для установления стационарного режима работы системы, составило 0.007 секунды. Так как вероятность потерь в стационарном режиме по сравнению с переходным режимом увеличивается, то пропускная способность системы будет снижаться, а значит уменьшится и ее устойчивость.

III. Заключение

В данной работе рассматривается переходной режим работы СМО с отрицательными заявками и применение данной модели для исследования устойчивости системы связи при воздействии помех. Разработаны алгоритмы для визуализации системы уравнений Колмогорова и проведения численных экспериментов.

Литература

[1] *Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И.* Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА».– 2018. – 564 с.

[2] *Gelenbe E., Glynn P., Signum K.* Queues with negative arrivals // *Journal of Applied Probability*. 1991. V. 28. P. 245-250.

[3] *Барабанова Е.А., Вытовтов К.А.* Аналитический метод исследования поведения системы массового обслуживания при скачкообразно-изменяющихся потоках информации // *Физические основы приборостроения*. 2021.– Т. 10.– № 1 (39).– С. 36-47.

Анализ устойчивости объекта информационной инфраструктуры с использованием модели СМО с ненадежным прибором

Е. А. Барабанова, М. А. Филонова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
barabanova@ipu.ru, zvezdfilonova@yandex.ru

***Аннотация**: в данной статье представлена математическая модель системы массового обслуживания с ненадежным прибором, описывающая функционирование коммутатора в условиях негативных воздействий со стороны злоумышленника. Составлен граф состояний системы, записана система уравнений Колмогорова, получены формулы для расчета основных показателей производительности системы, представлены численные результаты для модели M/PH/1/1.*

I. Введение

Математический аппарат теории массового обслуживания широко используется для исследования характеристик производительности современных систем связи. В тоже время данные модели могут быть использованы и для анализа устойчивости таких систем при внешних воздействиях. Одним из способов описания функционирования объектов информационных инфраструктур, таких как, коммутаторы сетей передачи данных, подверженных кибератакам, является использование модели системы массового обслуживания (СМО) с ненадежным обслуживающим прибором, пуассоновским входным потоком, фазовым распределением времени обслуживания и ограниченным буфером *M/PH/1/N*. В данной случае будем считать, что сеть передачи данных является устойчивой, если уменьшение пропускной способности центрального коммутатора при кибервоздействии снижается до уровня выше критического, необходимого для обслуживания всех устройств сети с требуемым качеством. Таким образом, возникает задача оценить пропускную способность коммутатора при изменении параметров системы, таких как интенсивность поступления и обслуживания пакетов, интенсивность отказов, вызванных кибератаками и интенсивность восстановления.

II. Математическая модель и граф состояний системы

Рассмотрим частный случай модели СМО с ненадежным обслуживающим прибором, описывающим функционирование коммутатора с размером буфера $N = 1$, с временем обслуживания пакетов, имеющим распределение фазового типа и определяющимся интенсивностями переходов β_1, β_2, β_3, τ_1, τ_2, τ_3, s_{12}, s_{21}, s_{32}, s_{23}, s_{13}, s_{31} между состояниями системы. Граф состояний данной СМО представлен на рис.1, согласно которому такая система может находиться в одном из 11 состояний:

S_1 –состояние, когда в системе отсутствуют пакеты;

S_5 –состояние, когда в системе обрабатывается один пакет обслуживающим устройством;

S_9 –состояние, когда в системе обрабатывается один пакет обслуживающим устройством и один пакет находится в буфере;

S_{10}– состояние, когда в коммутаторе находится один пакет в обслуживающем устройстве, но он не обрабатывается в связи с выходом из строя обслуживающего прибора;

S_{11} – состояние, когда в коммутаторе находится один пакет в обслуживающем устройстве и один пакет – в буфере, но они не обрабатываются, в связи с выходом из строя обслуживающего прибора;

Состояния S_2, S_3, S_4, S_6, S_7, S_8 – состояния системы, описывающие фазовое распределение времени обслуживания пакетов.

На рис.1 интенсивности переходов между состояниями $S_1, S_5, S_9, S_{10}, S_{11}$ обозначают следующие параметры системы: λ – интенсивность поступления пакетов; α – интенсивность отказа

обслуживающего прибора, вызванного кибератакой; η – интенсивность восстановления функционирования обслуживающего прибора.

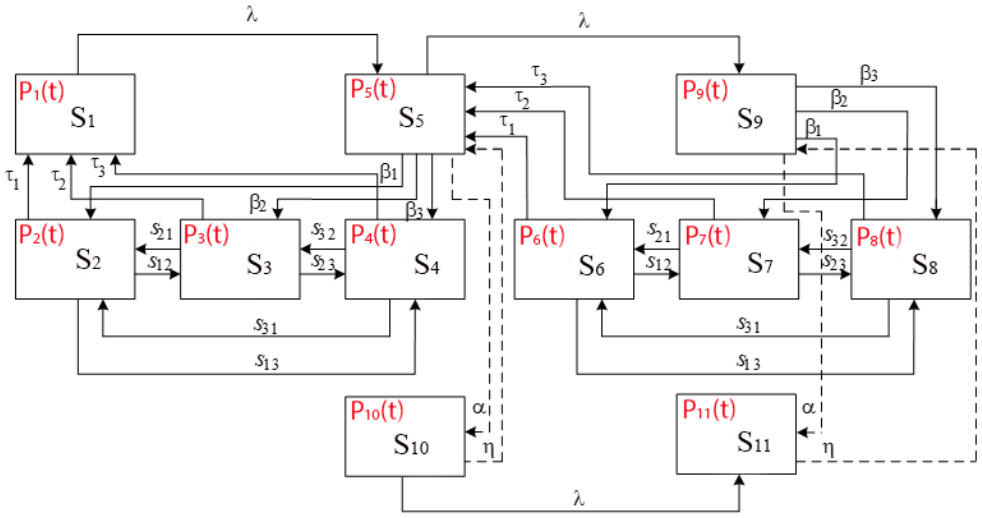


Рис. *1*. Граф состояний СМО M/PH/1/1 с ненадежным прибором

Рассматриваемая СМО описывается следующей системой дифференциальных уравнений Колмогорова (1):

$$\begin{cases} \dfrac{dp_1}{dt} = -\lambda p_1(t) + \tau_1 p_2(t) + \tau_2 p_3(t) + \tau_3 p_4(t) \\ \dfrac{dp_2}{dt} = -(\tau_1 + s_{12} + s_{13})p_2(t) + s_{12}p_3(t) + s_{31}p_4(t) + \beta_1 p_5(t) \\ \dfrac{dp_3}{dt} = s_{12}p_2(t) - (\tau_1 + s_{21} + s_{23})p_3(t) + s_{32}p_4(t) + \beta_2 p_5(t) \\ \dfrac{dp_4}{dt} = s_{13}p_2(t) + s_{23}p_3(t) - (\tau_3 + s_{31} + s_{32})p_4(t) + \beta_2 p_5(t) \\ \dfrac{dp_5}{dt} = \lambda p_1(t) - (\lambda + \alpha + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3)p_5(t) + \tau_1 p_6(t) + \tau_2 p_7(t) + \tau_3 p_8(t) + \eta p_{10}(t) \\ \dfrac{dp_6}{dt} = -(\tau_1 + s_{12} + s_{13}p_6(t) + s_{21}p_7(t) + s_{31}p_8(t) + \beta_1 p_9(t) \\ \dfrac{dp_7}{dt} = s_{12}p_6(t) - (\tau_2 + s_{21} + s_{23})p_7(t) + s_{32}p_8(t) + \beta_2 p_9(t) \\ \dfrac{dp_8}{dt} = s_{13}p_6(t) + s_{23}p_7(t) - (\tau_3 + s_{31} + s_{32})p_8(t) + \beta_3 p_9(t) \\ \dfrac{dp_9}{dt} = \lambda p_5(t) - (\alpha + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3)p_9(t) + \eta p_{11}(t) \\ \dfrac{dp_{10}}{dt} = \alpha p_5(t) - (\eta + \lambda)p_{10}(t) \\ \dfrac{dp_{11}}{dt} = \alpha p_9(t) + \lambda p_{10}(t) - \eta p_{11}(t) \end{cases} \quad (1)$$

Система решается операторным методом, который позволяет свести систему дифференциальных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений. Для этого сначала система (1) записывается в матричном виде:

$$\frac{d\overline{P}(t)}{dt} = \mathbf{B}\,\overline{P}(t) \quad (2)$$

где $\overline{P}$(t) – вектор вероятностей состояний; **B** – матрица коэффициентов дифференциальных уравнений системы (1).

После применения преобразования Лапласа к системе (2) и затем использования свойства дифференцирования оригинала, получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$(\boldsymbol{B} - \boldsymbol{I}p)\overline{P}(p) = -\overline{P}(0) \quad (3)$$

где **I** – единичная диагональная матрица.

Запишем (3) в виде:

$$\boldsymbol{A}P(p) = -\overline{P}(0) \quad (4)$$

где **A** = (**B** – p**I**) .

Решая систему (4) методом Крамера, получим вектор изображений вероятностей состояний системы $\overline{P}$ (p) , k-й элемент которого равен

$$P_{\mathrm{k}}(p) = \Delta_{\mathrm{k}}(p) / \Delta(p),$$

где Δ(p) – определитель матрицы **A**; $\Delta_k(p)$ – определитель матрицы $\mathbf{A}_k$, полученной путем замены k-го столбца матрицы **A** вектором начальных условий $\overline{P}$ (0) .

Окончательные выражения для вероятностей k-состояний системы в переходном режиме будут иметь вид:

$$P_{\mathrm{k}}(t) = \sum_{\mathrm{i}}^{=1\mathrm{n}} \left[\frac{\Delta_{\mathrm{k}}(p_{\mathrm{i}})\exp(p_{\mathrm{i}}\,t)}{\dot{\Delta}(p_{\mathrm{i}})}\right] \quad (5)$$

где n – общее число состояний системы.

III. Показатели производительности СМО с ненадежным прибором

Вероятность потери пакетов, определяемая как сумма вероятностей нахождения системы в состояниях переполнения буффера, для системы *M/PH/1/1* имеет вид:

$$P_{loss}(t) = P_9(t) + P_{11}(t) = \sum_{i=1}^{11}\left[\frac{\Delta_9(p_{\mathrm{i}})exp(p_{\mathrm{i}}\,t)}{\dot{\Delta}(p_{\mathrm{i}})}\right] + \sum_{i=1}^{11}\left[\frac{\Delta_{11}(p_{\mathrm{i}})exp(p_{\mathrm{i}}\,t)}{\dot{\Delta}(p_{\mathrm{i}})}\right] \quad (6)$$

Вероятность нахождения системы в состоянии восстановления, когда в систему поступает очередной пакет, но при этом пакеты не обслуживаются из-за выхода из строя обслуживающего устройства:

$$P_{rec}(t) = P_{10}(t) + P_{11}(t) = \sum_{i=1}^{11}\left[\frac{\Delta_{10}(p_{\mathrm{i}})exp(p_{\mathrm{i}}\,t)}{\dot{\Delta}(p_{\mathrm{i}})}\right] + \sum_{i=1}^{11}\left[\frac{\Delta_{11}(p_{\mathrm{i}})exp(p_{\mathrm{i}}\,t)}{\dot{\Delta}(p_{\mathrm{i}})}\right] \quad (7)$$

Пропускная способность коммутатора в переходном режиме, с учетом (6), имеет вид:

$$A(t) = [1 - P_{loss}(t)]\lambda = [1 - P_9(t) - P_{11}(t)]\lambda \quad (8)$$

IV. Численные результаты

Рассмотрим СМО с ненадежным обслуживающим прибором, описывающей функционирование коммутатора сети передачи данных, с характеристиками интенсивности поступления, обслуживания, времени обслуживания и др., приведенными в таблице 1.

Табл. *1.* Характеристики исследуемой системы

λ	α	β_1	β_2	β_3	τ_1	τ_2	τ_3	s_{12}	s_{21}	s_{32}	s_{23}	s_{13}	s_{31}
5,0	0,5	3,0	2,5	2,0	4,0	3,5	3,0	1,0	0,8	0,6	0,7	0,5	0,4

На Рис. 2 и Рис. 3 представлены графики вероятностей для набора данных 1 и 2. В первом наборе данных η=2,0, во втором η=1,5. Как видно из графиков, проверка нормировки выполнена: сумма вероятностей в первом и втором случае равна единице (пунктирная линия на графиках).

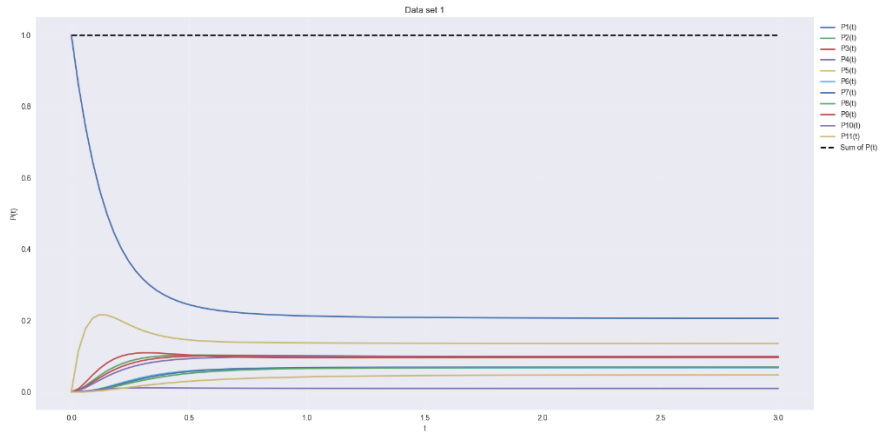


Рис. 2. График вероятностей для первого набора данных

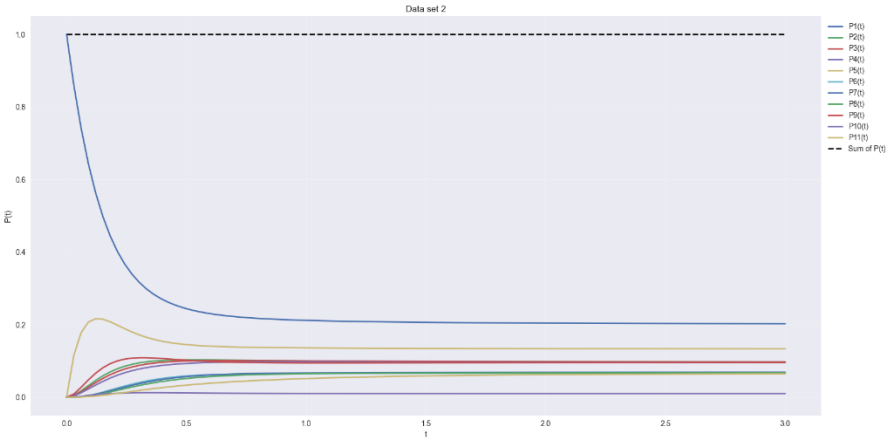


Рис. 3. График вероятностей для второго набора данных

На Рис. 4 видно, что при уменьшении интенсивности восстановления функционирования обслуживающего прибора пропускная способность снижается до уровня ниже критической пропускной способности, A_{crit}=4,25 (на рисунке критический уровень обозначен пунктирной линией).

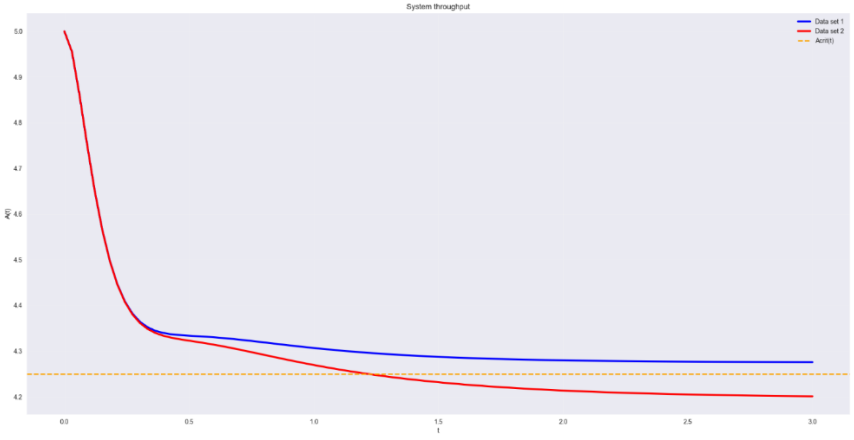


Рис. 4. Графики пропускных способностей

По Рис. 5 можно сделать вывод, что при уменьшении интенсивности восстановления, вероятность потерь увеличивается.

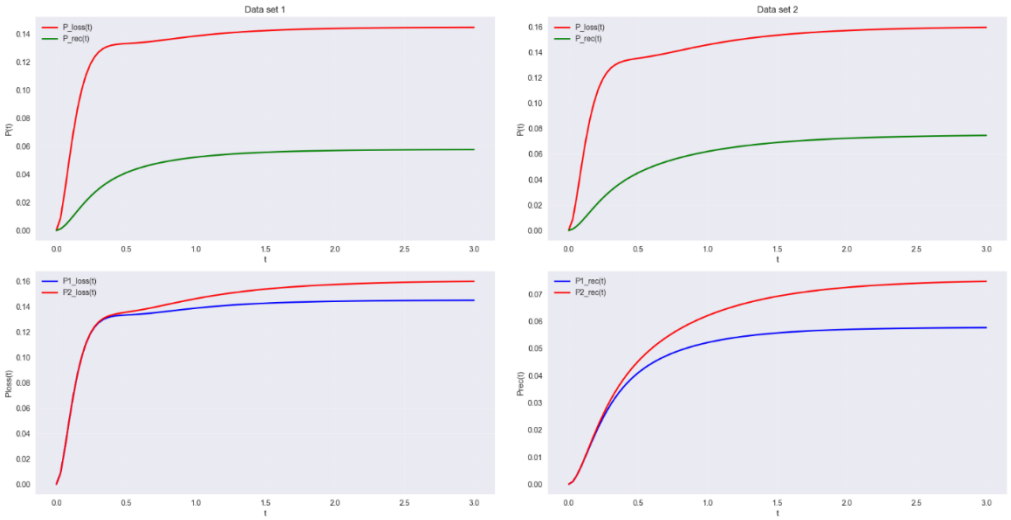


Рис. *5.* Графики вероятностей потерь и восстановления

V. Заключение

Проведено исследование показателей производительности системы *M/PH/1/1* с ненадежным прибором в переходном режиме. Разработана математическая модель, рассматриваемой системы, позволяющая оценить ее пропускную способность при выходе из строя обслуживающего устройства. Полученные результаты позволяют сделать вывод об устойчивости системы с большей интенсивностью восстановления.

Литература

[1] *Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И.* Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Рекламно-издательский центр "ТЕХНОСФЕРА", 2018. – 564 с.

[2] *Вытовтов К.А., Барабанова Е.А., Вытовтов Г.К., Антонов Н.А.* Математическая модель расчета и анализа характеристик оптического коммутатора в переходном режиме // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2023. № 3. С. 116-125.

[3] *Барабанова Е.А., Вытовтов К.А., Федоровская А.Н.* Математические модели и метод оценки надежности полностью оптических коммутаторов // *Computational nanotechnology*. 2024. Т. 11, № 5. С. 47-55.

Mathematical model of a nonlinear M/M/1/n queueing system

K. A. Vytovtov, A. V. Novochadova
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia,
vytovtov_konstan@mail.ru

Abstract*. This paper investigates a nonlinear queuing system of type M/M/1/n in which the service rate depends on the current loss probability. A system of Kolmogorov differential equations is derived and numerical experiments are conducted using the classical fourth-order Runge–Kutta method. The results show that increasing the proportionality coefficient between the loss probability and the service rate reduces losses, increases the probability of the idle state, and shortens transient processes. The proposed model reflects adaptive properties of real technical and organizational systems and can be applied to the design of resource management mechanisms with self-regulation.*

I. Introduction

Queuing systems (QS) are widely applied to study processes of arrival, allocation, and processing of requests in a broad range of fields: telecommunications, computer systems, logistics, and etc. [1-3]. Most models are based on linear Kolmogorov equations [2] with a Poisson input flow and exponential service times with constant rate. It allows for analytical solutions but limits applicability to real-world systems, where service mechanisms often adapt to overload conditions.

In practice, when the number of requests grows and the probability of losses increases, the service intensity may also change — either gradually due to additional resources or abruptly through control interventions. Linear models cannot describe this adaptive behavior; instead, nonlinear approaches are required. In this study, we analyze a queuing system of type M/M/1/n with a finite buffer, where the service intensity is assumed to depend linearly on the loss probability. The results are expected to provide insights into the development of adaptive resource management mechanisms and contribute to the broader study of nonlinear queuing systems with internal regulation.

II. Goals and objectives

The aim of this study is to investigate the state probabilities of a nonlinear M/M/1/n system under different dependencies of the service rate on the loss probability. To achieve this, the research focuses on deriving the corresponding system of nonlinear Kolmogorov equations, performing numerical experiments using the classical Runge–Kutta method, and analyzing the influence of the proportionality parameter on the system's performance. Particular attention is given to how variations in this parameter affect the probability of the idle state, the probability of losses, and the duration of transient processes.

III. Problem Statement and Model

We consider an M/M/1/n system with Poisson input flow of rate λ, exponential service law, and a finite buffer of size n. In contrast to the classical case, the service rate depends on the probability of losses $P_n(t)$ according to:

$$\mu(t) = aP_n(t),$$

where $a > 0$ defines the sensitivity of service intensity to overload.

This leads to a nonlinear system of Kolmogorov equations, where state probabilities $P_n(t)$ evolve under feedback from $P_n(t)$. The model reflects adaptive mechanisms: when the system approaches overload, the service intensity increases, reducing the probability of losses.

IV. Field experiment

The system of nonlinear equations is solved numerically by the classical fourth-order Runge–Kutta method [6]. The initial conditions are set to reflect the idle state of the system at time $t = 0$: $P_0(0) = 1$, $P_i(0) = 0$ for $i > 0$. Simulations are carried out for a wide range of values of parameter a. Results are analyzed with respect to both transient dynamics and steady-state probabilities.

The numerical experiments revealed consistent patterns in the behavior of the nonlinear M/M/1/1 system (Fig. 1). For small values of the proportionality parameter, the system shows weak adaptability. The analysis reveals the following trends.

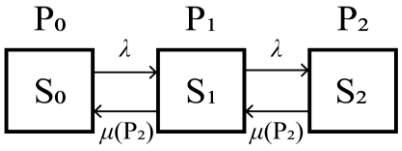


Fig.1. Structure of the studied M/M/1/1 model

For small values of a, the system behaves almost linearly: idle probability P_0 tends to zero, loss probability P_n approaches one, and transient time is relatively long.

For moderate values, state probabilities stabilize at nontrivial levels. Idle probability grows, while loss probability decreases.

For large a, idle probability reaches up to 0.91, while losses tend to zero.

The duration of transient processes shortens drastically: from ~0.0014 s at $a = 100$ down to ~0.00002 s at $a = 10^7$.

Thus, increasing the proportionality coefficient makes the system more robust to overload, improves performance, and accelerates convergence.

The computer simulation of the considered system in Python is implemented too. Then the comparative analysis between the data obtained by numerical calculation and the results generated by the simulation model is carried out. It is determined that the maximal difference between results of numerical calculations and simulation model is about 0.01. This fact says about correctness of the obtained results.

V. Conclusion

A nonlinear M/M/1/n queuing model with service intensity depending on the probability of losses has been formulated and studied. Results obtained through numerical and simulation modeling show that a higher sensitivity of service rate to losses reduces congestion and increases robustness. The approach provides a theoretical foundation for the design of adaptive resource management mechanisms in technical and organizational systems.

Acknowledgement

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-00926

References

[1] *V. M. Vishnevsky, D. V. Efrosinin*. Queueing theory and machine learning. Moscow INFRA-M, 2024, 370 p.

[2] *A. V. Vertemyagin, V. G. Litvin, Yu. V. Litvin*, "Performance evaluation of computing systems and networks under various survivability levels," Automation of Control Processes. 2021. No. 2. pp. 77–85.

[3] *A. I. Buravlev,* "The problem of designing a logistics system and a methodology for its solution", *Armament and Economics*, 3(65), 2023, p. 88.

[4] *E. S. Venttsel.* Operations research. Problems, principles, methodology: a textbook for universities. Moscow Drofa, 2004, 208 p.

Проектирование хаотических аттракторов

С. А. Волкова, К. А. Вытовтов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
svolkovav2017@gmail.com

***Аннотация**. Получена система, которая генерирует новые хаотические аттракторы. Найдены условия появления хаотических движений.*

I. Введение

Среди всех методов хаотической динамики особенно важны методы, позволяющие проектировать модели, адекватно описывающие хаотические процессы. В статье [1] рассматривалась система без положений равновесия; в [2] новая система построена на основе системы типа Лоренца.

II. Исследование наличия хаоса в системе

На рисунке 1 показано поведение траекторий системы при различных начальных условиях. Матрица Якоби в точке 0 имеет характеристический многочлен $q(\lambda)=\lambda^4+^{31}\lambda^2+100$, корни которого $\pm5{,}22903i, \mp1{,}91240i$ являются чисто мнимыми. Все решения этой системы периодические; гомоклинических орбит нет.

На рисунке 2 показано повеление траекторий системы (3D-проекция) при различных начальных условиях. Матрица Якоби в точке 0 имеет характеристический полином $q(\lambda)=\lambda^4+9\lambda^2-100$. Она имеет два действительных и два чисто мнимых корня: $\pm2{,}54280$; $\mp3{,}93267i$. Имеются гомоклинические орбиты. Однако при заданных параметрах в системе нет хаоса.

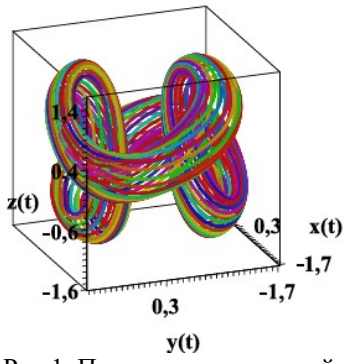


Рис.1. Поведение траекторий

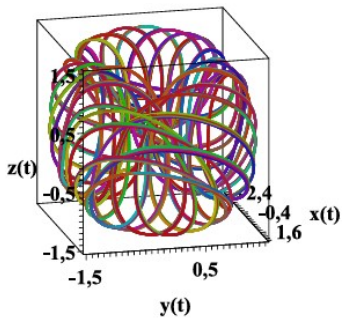


Рис.2. Поведение траекторий системы

III. Заключение

Предлагается подход построения хаотических аттракторов антисимметричных нейронных ОДУ. Суть метода заключается во введении системы, которая гарантированно содержит гомоклиническую орбиту. Далее эта система используется в качестве шаблона для основной системы, которая может генерировать произвольное количество хаотических аттракторов.

Литература

[1] *Gu, S., Peng, Q., Leng, X. & Du, B.* “A novel non equilibrium memristor-based system with multi-wing attractors and multiple transient transitions,”Chaos 31, 2021, 033105.

[2] *Lai, Q., Wan, Z., Akgul, A., Boyraz,O. F. & Yildiz, M. Z.* [2020a] “Design and implementation of a new memris tive chaotic system with application in touchless fin gerprint encryption,” *Chinese J. Phys*. 67, 615–630.

Исследование устойчивости вычислительного центра системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА

Е. А. Барабанова, К. А. Вытовтов, С. Э. Казаков
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
vytovtov_konstan@mail.ru, elizavetaalexb@yandex.ru, staskazackoff@yandex.ru

Аннотация. *В данной работе предложен подход к анализу характеристик производительности вычислительной системы центра управления системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА с использованием модели системы массового обслуживания с групповым марковским входным потоком. Подход позволяет оценить характеристики производительности системы в переходном режиме, а также учесть скачкообразный характер интенсивности обслуживания.*

I. Введение

При построении системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА важное значение играет проектирование вычислительной системы центра управления, от производительности которого зависит быстродействие всей системы. Так как в центр управления стекается информация от станций обнаружения и сопровождения сигналов от БПЛА в реальном времени, то в результате внешних воздействий велика вероятность возникновения скачков интенсивности обслуживания пакетов с управляющей и другого рода информацией.

Целью работы является исследование характеристик производительности и устойчивости данной вычислительной системы в условиях внешних воздействий с использованием модели системы массового обслуживания (СМО) с коррелированным входным потоком и скачкообразным изменением интенсивности обслуживания.

II. Постановка задачи

Рассматривается функционирование вычислительного центра системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА. При внешних воздействиях интенсивность обслуживания системы внезапно уменьшается, а затем восстанавливается до исходного значения.

Опишем функционирование данной вычислительной системы с использованием модели СМО с групповым марковским входным потоком *BMAP/M/1/N* и скачкообразным изменением интенсивности обслуживания $\mu(t)$. Граф состояний системы представлен на рисунке 1, на основе которого записана система дифференциальных уравнений Колмогорова (1). Согласно графу, система может находиться в одном из $M\times(N+2)$ состояний, где M–размерность состояний управляющего процесса, а N–размер буфера системы.

Для аналитического решения системы дифференциальных уравнений (1) был выбран метод матрицы преобразования вероятностей (МВП) [1], которая связывает между собой вероятности состояний системы в заданный момент времени с вероятностями состояний системы в начальный момент времени. В случае, если интенсивность обслуживания изменяется скачком в определенные моменты времени, МВП вычисляется как произведение МВП на соответствующих интервалах с постоянными параметрами. Используя значения вероятностей состояний системы в произвольный момент времени, можно найти характеристики производительности системы в переходных режимах, вызванных скачками интенсивности обслуживания, а значит и устойчивость вычислительной системы при внешних воздействиях.

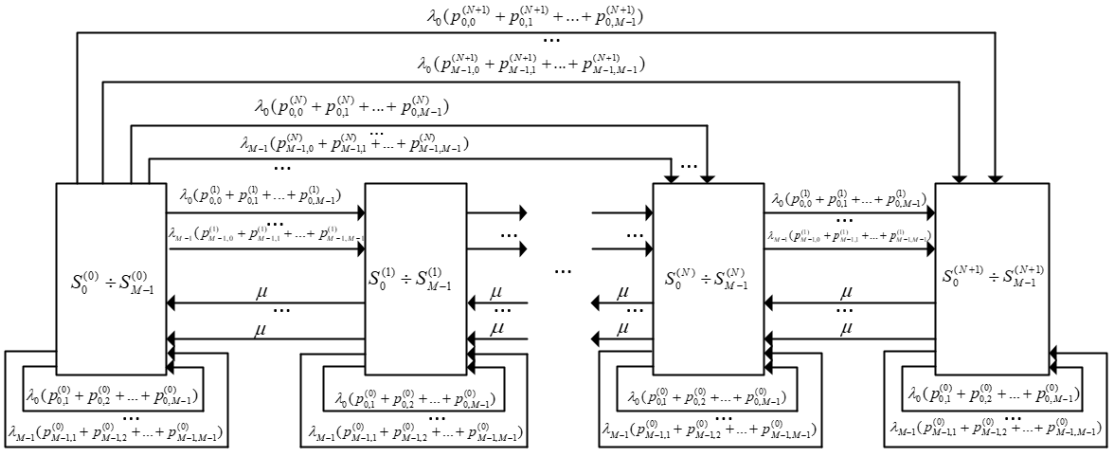


Рис. 1. Граф состояний СМО *BMAP/M/1/N*

$$\frac{d}{dt}\vec{\mathbf{P}} = \mathbf{A}\vec{\mathbf{P}} \tag{1}$$

где $\vec{\mathbf{P}}(t)$– вектор вероятностей состояний системы, **A** – матрица коэффициентов (1).

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} D_{00}^T & \mu I & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ D_1^T & D_{01}^T - \mu I & \mu I & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ D_2^T & D_1^T & D_{02}^T - \mu I & \mu I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ D_3^T & D_2^T & D_1^T & D_{03}^T - \mu I & \mu I & \dots & 0 & 0 \\ D_4^T & D_3^T & D_2^T & D_1^T & D_{04}^T - \mu I & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{k-1}^T & D_{k-2}^T & D_{k-3}^T & D_{k-4}^T & D_{k-5}^T & \dots & D_{0k-1}^T - \mu I & \mu I \\ D_k^T & D_{k-1}^T & D_{k-2}^T & D_{k-3}^T & D_{k-4}^T & \dots & D_1^T & D_{0k}^T - \mu I \end{pmatrix} \tag{2}$$

В (2) $\mathbf{D}_{00}^T$ и $\mathbf{D}_k^T$ – матрицы, описывающие управляющий процесс *BMAP*-потока [2] в случае отсутствия заявок и поступления группы из k заявок соответственно; μ– интенсивность обслуживания поступающих пакетов информации; **I**– единичная матрица.

III. Заключение

В данной работе предложен подход к исследованию характеристик производительности и устойчивости вычислительной системы центра управления системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА. Разработан граф состояний модели СМО *BMAP/M/1/N*, записана система уравнений Колмогорова, решение которой позволит найти вероятности состояний системы в переходном режиме в случае скачкообразного изменения интенсивности обслуживания.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00926, https://rscf.ru/project/25-29-00926/

Литература

[1] *Барабанова Е.А., Вытовтов К.А.* Аналитический метод исследования поведения системы массового обслуживания при скачкообразно-изменяющихся потоках информации // *Физические основы приборостроения*. 2021.– Т. 10.– № 1 (39).– С. 36-47.

[2] *Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И.* Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА».– 2018. – 564 с.

Комбинированный метод цифрового предыскажения для усилителя мощности

Хоанг Ван Туан
Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия,
Khoang.vt@phystech.edu

***Аннотация**: Цифровое предыскажение является эффективным методом снижения искажения сигнала, вызыванные усилителем мощности. В статье предлагается комбинированный метод цифрового предыскажения для линеаризации усилителя мощности. На первом этапе используется метод Левенберга-Марквардта для предворительной оптимизации коэффициентов предыскажения. Полученные параметры служат начальными значением для второго этапа, в котором осуществляется адаптивное обновление коэффициентов в реальном времени методом наименьших средних квадратов. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод существенно снижает уровень мощности в соседнемм канале, улучшает характеристики AM/AM и AM/PM, что улучшает качество сигнала и характеристику усилителя мощности.*

I. Введение

В современных системах беспроводной связи усилитель мощности играет важную роль. Однако при работе вблизи зоны насыщения он вызывает нелинейные искажения сигнала, которые снижают качество связи. Для устранения этих искажений эффективно использовать цифровое предыскажение (ЦПД) [1,2,3], которое позволяет улучшить линейность УМ и повысить качество работы системы. В данной работе предложен комбинированный метод ЦПД, основанный на предворительной оптимизации коэффициентов предыскажения с помощью метода Левенберга–Марквардта (LM) [4], который обеспечивает точную начальную оценку параметров модели и адаптивное обновление коэффициентов предыскажения с помощью метода наименьших средних квадратов (LMS) [5,6], обладающий низкой вычислительной сложностью и способный подстраиваться к изменениям характеристик УМ в реальном времени.

II. Комбинированный метод цифрового предыскажения

1. Цифровое предыскажение на основе метода наименьших средних квадратов

Метод наименьших среднеквадратичных ошибок (LMS) [5,6] реализует пошаговую адаптацию коэффициентов с целью минимизации среднеквадратичной ошибки между предыскажённым сигналом $u(n)$ и выходом сигналом $z_p(n)$ пост-предыскзителя полученной на основе текущих коэффициентов. Основными преимуществами метода являются простота реализации и малая вычислительная сложность, однако при сильной нелинейности УМ и наличии эффектов памяти алгоритм характеризуется медленной сходимостью и чувствительностью к параметру шага адаптации.

2. Цифровое предыскажение на основе метода Левенберга–Марквардта

Метод Левенберга–Марквардта (LM) [4] представляет собой метод оптимизации, используемый для определения коэффициента искажения путем минимизации среднеквадратичной ошибки между предыскажённым сигналом $u(n)$ и выходным сигналом пост-предыскзителя $z_p(n)$, данный метод обеспечивает быструю, точную сходимость но при использовании в реальном времени требует обработки по блокам данных, что приводит к вычислительной задержке и требует больших вычислительных ресурсов.

3. Комбинированный метод цифрового предыскажения

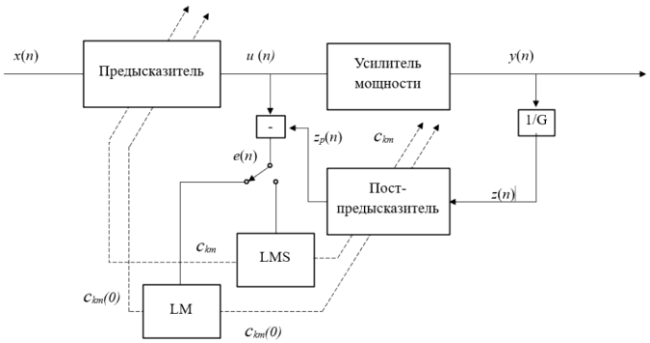


Рис.1. Комбинированный метод цифрового предыскажения

На рисунке 1 представлена комбинированная схема, использующая преимущества высокой точности и быстрой сходимости метода LM для повышения эффективности применения метода LMS, который отличается простотой реализации на практике. На первом этапе используется метод Левенберга–Марквардта (LM) для получения начального приближения коэффициентов цифрового предыскажения. Это приближение $c_{km}(0)$ затем служит начальное значение для LMS, реализуемого в режиме реального времени. Математически описывается следующим образом:

- Первый этап: Предворительная оптимизация коэффициента предыскажения по LM

1. Получить набор данных для $\{u(n), z(n)\}_{n=1}^{N}$
2. Определить ошибку и матрицу Якобиана: $e(n) = u(n) - z_p(n), j = \partial e/\partial c.$
3. Обновить коэффициент предыскажения $c_{\text{новый}} = \mathrm{c}_{\text{текущий}} + (j^T j + \lambda I)^{-1} j^T e.$

Начальное значение для адаптивного обновления коэффициента предыскажения по LMS

$\mathrm{c}_{\mathrm{km}}(0) = \mathrm{c}_{\text{новый}}$

- Второй этап: адаптивное обновление коэффициента предыскажения по LMS

1. Определить мгновенную ошибку: $e(n) = u(n) - z_p(n)$
2. Обновить коэффициент предыскажения : $c_{km}(n+1) = \mathrm{c}_{km}(n) + \mu e(n) z^T(n).$

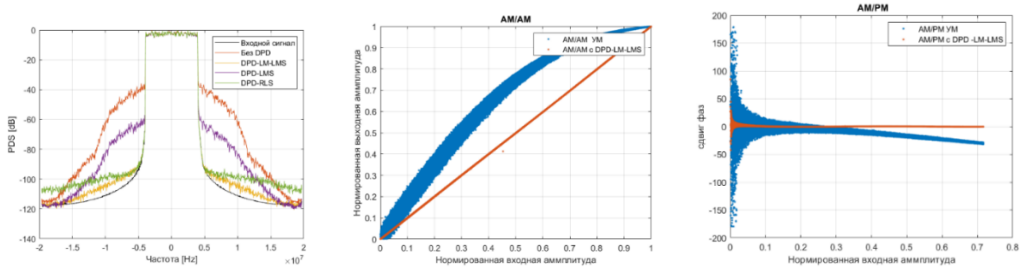
III. Результат моделирования

Для оценки эффективности предлагаемого метода в данной работе используется модель усилителя мощности из работы [7], математическое описание представлено следующим образом:

$$y(n) = \frac{\alpha_a |v(n)|}{1 + \beta_a |v(n)|^2} e^{jarg\left[\frac{\alpha_\varphi |v(n)|^2}{1+\beta_\varphi |v(n)|^2}\right]} \quad (1)$$

$$v(n) = h_0 x(n) + h_1 x(n-1) + h_2 x(n-2) \quad (2)$$

где, $\alpha_a = 2, \beta_a = 2.2, \alpha_\varphi = 2, \beta_\varphi = 1, h_0 = 0.7962, h_1 = 0.0654, h_2 = 0.0769$



а) б) с)

Рис.2. а) Спектральная мощность сигнала
б) AM/AM при примменении ЦПД
с) AM/PM при примменении ЦПД

На рисунке 2.a показана спектральная мощность сигнала при использовании и без использования ЦПД. Видно, что применение ЦПД эффективно снижает утечку мощности на соседние каналы. Предлагаемый метод показывает лучшую эффективность по сравнению с методами LMS и RLS, с уровнем ACPR, равным –48,8 дБ. Кроме того, на рисунках 2.b и 2.c представлены характеристики AM/AM и AM/PM. Использование технологии ЦПД значительно снижает негативные эффекты, вызываемые усилителем мощности.

IV. Заключение

В данном исследовании предложен комбинированный метод ЦПД, сочетающий предварительную оптимизацию коэффициентов на основе алгоритма LM и адаптивное обновление коэффициентов с помощью алгоритма LMS. Результаты моделирования подтверждают, что предложенный комбинированный метод превосходит традиционные алгоритмы LMS и RLS по эффективности компенсации нелинейных искажений. Метод может быть применен для УМ с высокой степенью нелинейности и использован в ЦПД для систем связи пятого и более высоких поколений.

Литература

[1] *Kwon J., Eun C.* Digital feedforward compensation scheme for the non-linearpower amplifier with memory // *IJISTA*. 2010. Т. 9. С. 326–334

[2] *Vu V. K., Tran V. N.* Adaptive digital predistortion of RF power amplifiers based on memory polynomial model and indirect learning architecture // *Proc.2020 Int. Conf. Engineering and Telecommunication (En&T)*, IEEE, 2020.С. 1–5.

[3] *Lv J., Xu G., Zhang C., Zhang H., Liu T.* Full-Wave Digital Predistortion Linearization Based on Memory Polynomials for HF Power Amplifiers // *IEEE Access*. 2024. Т. 12. С. 29362–29372.

[4] *Хоанг Ван Туан, Дворкович А. В.* Исследование эффективности цифрового предыскажения на основе полиномиальной модели памяти и алгоритма Левенберга–Марквардта для усилителей мощности // *Цифровая обработка сигналов*. 2025. № 1. С. 10–16.

[5] *Le D. H. et al.* Linearization of RF power amplifiers in wideband communication systems by adaptive indirect learning using rpem algorithm //*Mobile Networks and Applications*. – 2020. – Т. 25. – С. 1988-1997.

[6] *Mohr B, Li W, Heinen S* (2012) Analysis of digital predistortion architectures for direct digital-to-RF transmitter systems. In: *Proc. 2012 IEEE 55th international midwest symposium on circuits and systems (MWSCAS)*, pp 650–653.

[7] *Saleh AAM* (1981) Frequency-independent and frequency dependent nonlinear models of twt amplifiers. *IEEE Trans Commun COM*-29(11):1715–1720.

Имитационное моделирование процесса функционирования парка пассажирских электробусов

С. И. Шеховцов[1], Е. С. Шеховцова[1], Р. С. Ловчев[1], Д. А. Скоробогатченко[2]
[1]Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Камышин, Россия,
[2]Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия,
mr.sergey.shekhovtsov@mail.ru, arinka600@mail.ru, lovchev1997@gmail.com, Dmitryskor2004@gmail.com

Аннотация. *Представлена имитационная модель работы парка пассажирских электробусов. Модель реализована в среде транспортного моделирования SUMO (Simulation of Urban MObility) и учитывает движение электробусов по городскому маршруту с заданным расписанием, остановками и промежуточными зарядными станциями. В ходе имитации отслеживаются ключевые параметры: скорость движения, пройденное расстояние, уровень заряда батареи и энергопотребление каждого электробуса. Разработанная модель позволяет воспроизвести цикл работы электробуса: выход на маршрут, движение между остановками с посадкой/высадкой пассажиров, принятие решения о необходимости подзарядки, заезд на зарядную станцию и продолжение рейсов. Проведенные эксперименты показали, что предложенная схема движения и зарядки обеспечивает выполнение расписания при минимальных простоях. Получены графики изменения скорости и расхода энергии электробуса в течение рабочего цикла. Результаты имитации демонстрируют возможность повышать эффективность использования электробусов за счёт оптимизации расписания рейсов и работы зарядной инфраструктуры. Выводы могут быть использованы городскими транспортными службами для планирования парка электробусов с учётом ограничения по запасу хода и времени зарядки.*

I. Введение

Переход на электрический транспорт в городах становится важной тенденцией в связи с ужесточением экологических требований. Во многих странах реализуются программы электрификации общественного транспорта, в рамках которых традиционные автобусы заменяются на электробусы. Эксплуатация электробусов предъявляет новые требования к планированию маршрутов и расписаний из-за ограниченного запаса хода на одном заряде аккумуляторов и необходимости времени для зарядки. Эти факторы требуют пересмотра графиков работы подвижного состава и развития зарядной инфраструктуры. Для предварительной оценки подобных изменений и поддержки принятия решений применяются методы имитационного моделирования. Моделирование позволяет исследовать различные сценарии работы электротранспорта и оптимизировать параметры его функционирования без затрат на натурные эксперименты.

В работе предлагается имитационная модель парка пассажирских электробусов, реализованная в программной среде SUMO (Simulation of Urban MObility).

Цель моделирования – исследовать процесс движения электробусов по маршрутам городского транспорта с учётом расхода энергии и перерывов на зарядку, а также выработать рекомендации для составления расписаний и размещения зарядных станций.

II. Имитационная модель функционирования парка

Разработанная имитационная модель описывает процесс движения электробусов на маршруте: следование по маршруту, расход энергии батареи, заезд на зарядную станцию и возврат на линию. Логика модели основана на дискретно-событийном подходе, где событиями являются отправление электробуса от начальной остановки, прибытие на конечный пункт, начало и конец зарядки. Входными данными служат параметры маршрута (длина, число остановок, интервал движения) и

характеристики электробуса КАМАЗ-6282: запас хода ~70 км на одной зарядке, время полной зарядки батареи ~20–30 мин, пассажировместимость 85 человек. На основе входных данных модель воспроизводит работу всего парка в течение рабочего времени.

В имитации заложено несколько единиц электротранспорта, которые поочерёдно движутся по маршруту. Когда заряд батареи отдельного электробуса опускается до порогового уровня, модель отправляет его на зарядку, а на линию выпускается резервный автобус, что позволяет сохранить заданный интервал движения. Если резервных электробусов недостаточно, возникают интервальные сбои (увеличение интервала сверх нормы). Таким образом, модель имитирует непрерывный цикл работы: пока часть машин перевозит пассажиров, другая часть находится на зарядке.

На рисунке 1 оказаны результаты имитационного моделирования работы электробуса на маршруте в течение рабочего времени. Графики отражают ключевые параметры его функционирования.

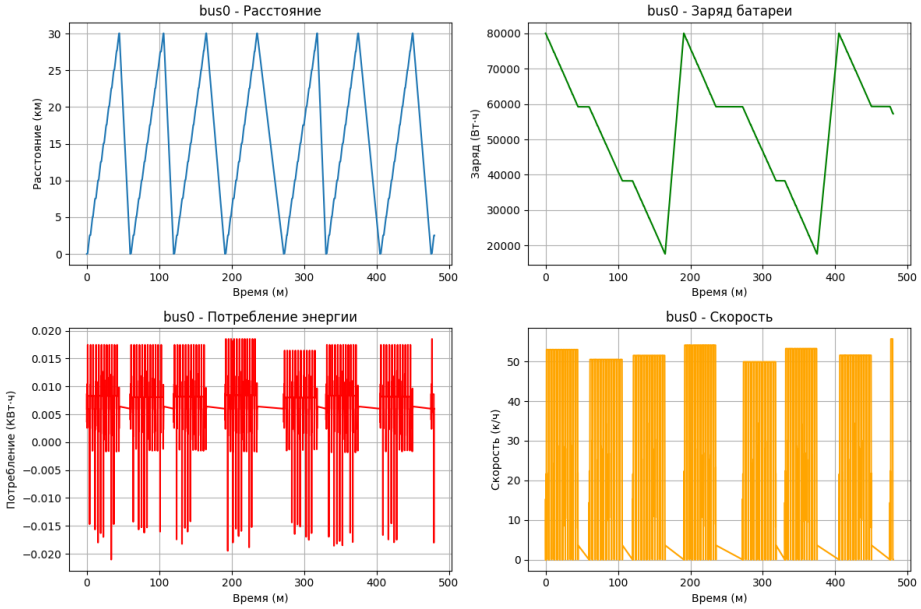


Рис.1. Графики пройденного расстояния, изменения уровня заряда батареи, потребления энергии и скорости

Совместный анализ графиков позволяет оценить эффективность работы электробуса: циклическое движение по маршруту, частоту и продолжительность зарядок, динамику расхода энергии, а также изменения скорости на маршруте. Выходные данные могут быть использованы для оптимизации расписания движения и стратегий подзарядки парка электробусов.

Моделирование позволяет определить минимально необходимое количество электробусов в парке для обеспечения регулярного движения на маршруте без срывов расписания. Модель рассчитывает коэффициент использования парка (долю времени, когда электробус находится на линии), среднесуточный пробег электробуса, общее количество рейсов, выполненных за день, и суммарный простой на зарядку.

III. Заключение

Модель, реализованная в SUMO, воспроизводит движение электробусов по маршрутам с учётом ограничений по запасу хода и позволяет оценивать влияние различных стратегий зарядки на выполнение расписания. На основе результатов моделирования могут быть сформулированы рекомендации по оптимизации расписания движения (например, введение технологических перерывов для подзарядки), определению необходимого количества и расположения зарядных станций, а также по требуемому размеру парка электробусов для обеспечения заданного уровня транспортного обслуживания. Применение данной модели в качестве системы поддержки принятия

решений позволит городским транспортным операторам снижать риски при переходе на электрический общественный транспорт и выбирать оптимальные сценарии его функционирования. В дальнейших исследованиях планируется актуализировать модель, учитывая стохастические факторы (непредвиденные задержки, вариации энергопотребления) и расширять набор оцениваемых показателей эффективности работы электрического транспорта.

Литература

[1] *Topić J., Soldo J., Maletić F., Škugor B., Deur J.*, “Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning” *Energies*, 2020, Vol. 13, no. 13., P. 3410.

[2] *Каталевский Д. Ю., Гареев Т. Р.*, “Имитационное моделирование для прогнозирования развития автомобильного электротранспорта на уровне региона” *Балтийский регион*, 2020, Т. 12, № 2, С. 118–139.

[3] *Масленников И. К., Карпухин К. Е., Климов А. В., Оспанбеков Б. К.*, “Верификация имитационной модели движения электробуса КАМАЗ” *Труды НАМИ*, 2021, № 4, С. 60–67.

[4] *Würtz S., Bogenberger K., Göhner U., Rupp A.*, “Towards Efficient Battery Electric Bus Operations: A Novel Energy Forecasting Framework” *World Electric Vehicle Journal*, 2024, Vol. 15, no. 1, P. 27.

[5] *Zhang M., Mohamed M., Foda A., Guo Y.,* “Optimal Electric Bus Charging Scheduling with Multiple Vehicle and Charger Types Considering Compatibility” *Sustainability*, 2025, Vol. 17, no. 8, P. 3294.

Устройство анализа датчиков системы пожаротушения в сфере Интернет вещей

А. Ю. Трофимов, А. Н. Ушков, В. С. Фланден,
Д. С. Чукашов, Р. И. Штанько, С. Е. Пономарева
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Россия,
TrofimovAnY@mpei.ru, UshkovAN@mpei.ru, FlandenVS@mpei.ru,
ChernikovAI@mpei.ru, ShtankoRI@mpei.ru, PonomarevaSY@mpei.ru

Аннотация. *В настоящее время разработка многофункциональных устройств и программного обеспечения для Интернета вещей тесно связаны с множеством инженерных направлений, одним из которых является пожарная безопасность. Особый интерес представляет использование производительных микроконтроллеров в составе различных устройств, связанных с системами пожаротушения, позволяющих сделать такую систему более автоматизированной и минимизировать человеческий фактор в её работе. В данной работе предложено использование конструкции устройства для анализа пожарных датчиков в реальном времени и последующего оповещения. В рамках работы показана схема работы устройства, также алгоритм сбора и анализа данных с датчиков пожарного оповещения. Полученные в ходе работы результаты показали потенциал для расширения возможностей и последующего улучшения как конструктивных параметров самого устройства, так и программного обеспечения.*

I. Введение

Современные автоматизированные системы пожаротушения в большинстве своем используют цифровые микросхемы, особенно микроконтроллеры, отвечающие за степень автоматизации. Также использование различных интерфейсов связи, такие как UART, CAN, USB, SPI, позволяют осуществлять общение с внешними управляющими устройствами и системами мониторинга и сбора данных в облачных системах, позволяющих анализировать состояние системы в реальном времени. Такой подход позволяет своевременно предупреждать об опасности при задымлении или возгорании внутри помещений. Также не менее важно для системы использовать отечественные компоненты, что практически всегда является актуальной повесткой при разработке любых устройств. Следовательно, было создано такое устройство, которое бы соответствовало критериям быстродействия и надежности[1]. Основой данного устройства стал отечественный микроконтроллер 1986ВЕ91Т в металлокерамическом корпусе. Пожарные извещатели представляют собой датчики с токовым выходом и бронированным корпусом, оказывающие ответную реакцию изменением тока на выходе на задымление за счет оптической системы внутри.

Таким образом, особый интерес при разработке устройства представляет использование отечественной элементной базы, так как это позволяет не зависеть от поставок различных компонентов при проектировании, а также создание оптимального программного алгоритма для решения практической инженерной задачи при использовании связи с облачной системой для сбора данных.

II. Основные результаты

В настоящей работе оценивается качество работы устройства с программным алгоритмом для обработки данных с выходов пожарных датчиков. Также оценивается возможность проверки работоспособности датчиков в реальном времени и мониторинг состояния каждого датчика и сбор статистики срабатываний. Для анализа датчиков используется схемотехническая реализация нагрузки на токовый выход пожарного извещателя, которая обеспечивает измерение напряжения. Измеренные данные с помощью АЦП микроконтроллера сравниваются с пороговыми значениями

внутри алгоритма для определения состояния датчика. В случае, если сработало два и более датчика, то устройство выдает соответствующее сообщение о пожаре по интерфейсу UART на внешний пункт сбора данных, а также на внешнюю панель через оптическое реле для визуальной индикации. Статистика срабатываний пожарных датчиков хранится и анализируется в облачной системе [2]. Такой подход позволяет заблаговременно выявить потенциальную неисправность каждого датчика и оперативно предупреждать о возникших задымлениях [3], а анализ статистики срабатываний [4] позволит видеть картину более опасных участков, где находятся датчики [5].

а) б)

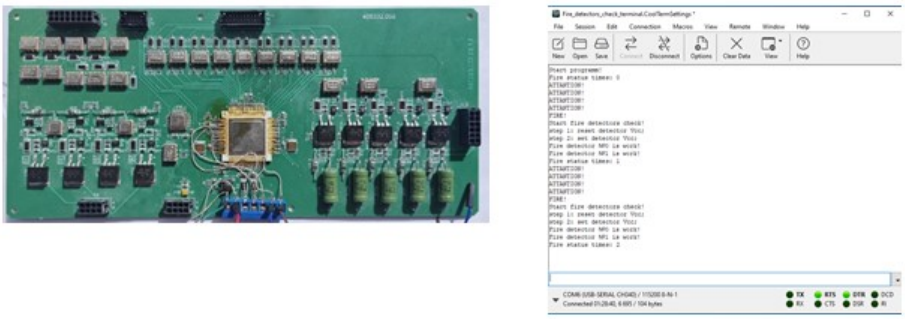


Рис. 1. Внешний вид устройства и программного обеспечения

На рисунке 1 показаны: а) конструкция платы устройства, включающая в себя микроконтроллера 1986BE91T как основу для измерения и анализа состояния датчиков; б) окно терминала, где показан результат проверки работоспособности пожарных датчиков и статистика срабатываний. Проведено несколько экспериментов, где срабатывание происходило поочередно, так как сообщение о пожаре может передаваться в случае, если как минимум два датчика смогут уловить задымление. Датчик имеет особенность выдавать на своем токовом выходе импульс при отключении питания на одну секунду, что позволяет реализовать событие проверки работоспособности датчика для минимизации ложных откликов.

III. Заключение

По полученным в эксперименте результатам можно сделать вывод, что использование облачных систем позволяет более широко анализировать полученные данные для последующей оптимизации системы, что представляет интерес для развития в сфере пожарной безопасности. Созданное устройство и программный алгоритм может быть использован для задач автоматизации анализа задымленности различных помещений, а общение с устройством и мониторинг в реальном времени уменьшают риск ложных срабатываний, что положительно сказывается на финансовых издержках.

Литература

[1] *Strelkov N. O., Krutskikh V. V., Shalimova E. V.* Programming STM32 nucleo platform for IoT education using STM32duino and mbed OS //2022 *VI international conference on information technologies in engineering education (inforino). – IEEE*, 2022. – С. 1-6.

[2] *Mikhailov M. S., Strelkov N. O.* Application of wi-fi and LoRa technologies for wireless measurement of physical quantities //*2019 international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE)*. – IEEE, 2019. – С. 1-4.

[3] *Krutskikh V. V. et al.* Industrial Internet of Things Algorithms for Fire Safety System Control //*2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – IEEE, 2024. – С. 853-858.

[4] *Крутских В. В., Сизякова А. Ю., Ушков А. Н., Фролов Д. Ю., Чукашов Д. С., Трофимов А. Ю., Селин Д. С.,Мирзоян А. Э.* Оценка влияния обратной связи на характеристики фильтров в системах космической связи. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025*. Т. 12. № 1. С. 52–63.

[5] *Krutskikh V. V. et al.* Wireless degassing sensor for the industrial internet of things in heating systems //*2023 international ural conference on electrical power engineering (UralCon)*. – IEEE, 2023. – С. 769-774.

Исследование задержек передачи FPV-видеопотока через геостационарную систему спутниковой связи

А. А. Березкин, А. А. Ченский, З. В. Кулунчаков, А. И. Козлова, Р. В. Киричек
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия,
berezkin.aa@sut.ru, chenskii.aa@sut.ru, kulunchakov.zv@sut.ru, kozlova.ai@sut.ru, kirichek@sut.ru

Аннотация. *Для управления беспилотными летательными аппаратами от первого лица необходима передача видеопотока со стороны БПЛА на станцию внешнего пилота. Чем меньше задержка передачи видеопотока, тем более соответствующие текущей полётной обстановке команды управления может передать внешний пилот. Задержка видеопотока определяется параметрами каналов информационного обмена, протоколами передачи и используемыми видеокодеками. В данной статье рассматриваются способы передачи видеопотока через геостационарный канал информационного обмена на базе спутников «Ямал-601» и прикладные задержки кадров FPV-видеопотока. Рассмотрены как стандартные видеокодеки (AVC/H264, HEVC/H265, VVC/H266, VP9, AV1), передающие данные по протоколу RTP; так и нейросетевые: кодеки, основанные на нейросетевых моделях вариационного автокодировщика KL-f4, и модели глубокого сжатия видеоконтекста DCVC-RT.*

I. Введение

При управлении беспилотными воздушными судами (БВС) от первого лица (FPV-управление) необходима передача видеопотока, команд управления и телеметрии между БВС и станцией внешнего пилота (СВП). Видеопоток и телеметрия поступают от БВС к СВП по линии связи с землёй. Команды управления поступают от СВП к БВС по линии связи с бортом. В совокупности БВС, СВП, линия связи с землёй и линия связи с бортом представляют собой беспилотную авиационную систему (БАС) [1]. Линии связи с бортом и землёй на прикладном уровне модели OSI могут рассматриваться как каналы информационного обмена (КИО).

В Стратегии развития отрасли связи до 2035 года, утверждённой постановлением правительства от 24 ноября 2023 года №3339-р, указано, что управление БВС на всей территории Российской Федерации может быть обеспечено на основе гибридных орбитально-наземных сетей связи (ГОНСС). Структура такой ГОНСС включает в себя два сегмента: наземного, включающего мобильные сети связи, и космического, включающего системы спутниковой связи. К космическим сетям связи относятся, в частности, геостационарные системы спутниковой связи [2].

Применение геостационарных систем спутниковой связи позволяет обойти ограничения мобильных сетей и предоставлять услугу FPV-управления БВС с широким покрытием на всей территории Российской Федерации. Основная проблема FPV-управления БВС через геостационарные системы спутниковой связи – это высокая задержка распространения сигнала. Геостационарная орбита находится на высоте 35786 км над уровнем моря, и для передачи пакета от источника к получателю сигналу требуется преодолеть приблизительно 71572 км, что занимает около 240 мс без учета обработки на всех транзитных узлах.

Как известно, FPV-управление является услугой реального времени. Соответственно, существует максимальное время рассинхронизации видеопотока и команд управления, при котором её оказание становится возможным. В рекомендации 3GPP 22.829 [3] максимальную задержку видеопотока принимают равной 100 мс. Исследование [4] показало, что она более точно оценивается как 250 мс. Кроме этого, в [5] представлен метод, позволяющий уменьшить задержку распространения видеопотока на 40-120 мс в зависимости от динамики видеопотока.

Прикладная задержка передачи FPV-видеопотока больше задержки распространения сигнала и включает помимо сетевой составляющей также задержки инкапсуляции, декапсуляции, кодирования и декодирования кадров видеопотока. Прикладная задержка видеопотока зависит от сети связи, видеокодека и его установленных параметров, а также прикладного протокола передачи кадров видеопотока.

Помимо стандартных кодеков для передачи FPV-видео могут применяться и нейросетевые кодеки [6–9]. Особенностью нейросетевых кодеков является обеспечение большей степени сжатия кадров и, как следствие, меньшая полоса пропускания канала связи.

Требования к максимальной задержке видеопотока приводят к необходимости оценки возможности оказания услуги FPV-управления БВС через геостационарные системы спутниковой связи различными методами. В настоящей работе проводится сравнение нескольких методов передачи видеопотока, основанных на стандартных (AVC/H264, HEVC/H265, VCC/H266, VP8, VP9, AV1) и нейросетевых кодеках. Совместно со стандартными кодеками применяется протокол RTP, а с нейросетевыми кодеками – на текущий момент разрабатываемый протокол FPV-CVP [10].

II. Методика

На мониторе 1 отображается видео интенсивностью 25 FPS. Видео содержит цифры, указывающие время, прошедшее от начала проигрывания. Монитор снимает камера, соединённая с ПК-А. На ПК-А проводится кодирование видепотока рассматриваемыми методами сжатия. Видеопоток на ПК-А отображается на мониторе А. Далее видеопоток отправляется на ПК-Б по протоколу RTP через геостационарную спутниковую сеть связи «Ямал-601» и сеть Интернет. На ПК-Б видеопоток декодируется и отображается на мониторе Б. Прикладная задержка метода передачи видеопотока считается как разница во времени между кадрами, отображаемыми на мониторах Б и А. Выборка задержек очищается квартильным критерием [11].

III. Условия проведения испытаний

Спутниковые терминалы: PC-30M. габариты: 850x450x350 мм. Вес: 3 кг. Модем: SkyEdge II-c Gemini-I S2X. Приёмопередатчик: Ka Band Transceiver 2,5 W. Геостационарная спутниковая сеть связи Ямал-601. Скорость приёма: до 50 Мбит/с. Скорость передачи: до 5 Мбит/с. Ping – 651 мс. Джиттер – 329 мс. Уровень приёма сигнала 4,6 дБм. Мощность передачи 65,3 дБм.

Климатические условия испытаний. Температура окружающей среды: +3 °C. Сплошная облачность. Осадки в виде дождя.

IV. Результаты экспериментов

В результате экспериментов получены задержки для видеопотоков различной интенсивности (низкой, средней, высокой) и качества (HD, FullHD), различных методов передачи (протокол RTP с H264, H265, H266, VP9, AV1, а также протокол FPV-CTVP с конфигурациями нейрокодека NVC1, NVC2 и NVC3).

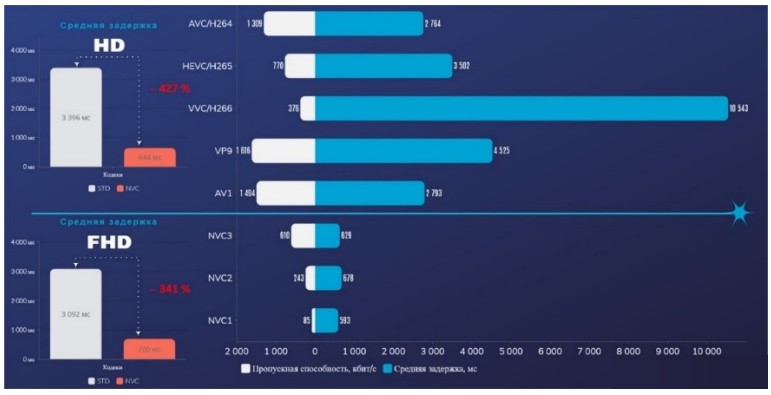


Рис.1. Средние задержки по разрешениям видеопотока

При передаче видеопотока через геостационарную спутниковую систему связи средние задержки передачи FPV-видео распределились следующим образом: RTP+H266 (10543 мс при полосе 376 Кбит/с), RTP+VP9 (4525 мс при полосе 1616 Кбит/с), RTP+H255 (3502 мс при полосе 770 Кбит/с), RTP+H264 (2764 мс при полосе 1309 Кбит/с), FPV-CTVP+NC2 (678 мс при полосе 243 Кбит/с), FPV-CTVP+NC3 (629 мс при полосе 610 Кбит/с), FPV-CTVP+NC1 (593 мс при полосе 85 Кбит/с) (рис. 1).

V. Заключение

В настоящей работе проведены эксперименты по измерению задержки передачи видеопотока: кодированных и передаваемых разными методами (протокол RTP и AVC/H264, AVC/H265, AVC/H266, VP9, AV1; протокол FPV-CTVP и NC3, NC2, NC3). Видеопоток интенсивности 25 FPS передавался по геостационарной системе спутниковой связи.

Методы передачи видеопотока, основанные на использовании стандартных видеокодеков, показали высокую прикладную задержку (от 2764 до 10543 мс). Для кодеков стандартов H264, VP9 и AV1 необходима большая полоса пропускания (от 1309 до 1616 Кбит/с) в то время, как H265 и H266 требуют умеренную полосу пропускания (700 и 376 Кбит/с), соответственно.

Методы передачи видеопотока, основанные на нейросетевых кодеках, отличаются низкой задержкой (менее 1000 мс) и меньшей необходимой полосой пропускания (от 85 Кбит/с до 610 Кбит/с). Применение этих методов уменьшают задержку передачи видеопотока по сравнению со стандартными кодеками в среднем в 5 раз с экономией полосы пропускания в среднем в 3,5 раза.

VI. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области создания и развития систем телеметрии, управления и связи для беспилотных авиационных систем на период до 2030 года с учетом импортозамещения" (регистрационный номер ПТНИ: 1024032900105-1)

Литература

[1] ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения // *СтандартИнформ. Москва*, 2016. 12 с.

[2] *Галькевич И.А.* Обзор телекоммуникационного рынка геостационарных спутников связи и вещания // *Космонавтика и ракетостроение*. 2014. №. 3. С. 103-111.

[3] 3GPP 22.829. Enhancement for Unmaned Aerial Vehicles (UAVs). 2018.

[4] *González N., Solera M., Ruiz F., Gijón C., Toril M.* A quality of experience model for live video in first-person-view drone control in cellular networks // *Computer Networks*. 2023. Т. 237. С. 110089.

[5] *Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В.* Уменьшение задержки передачи FPV-видеопотока при управлении БПЛА через спутниковые каналы связи методом предсказания // *Электросвязь*. 2025. № 4. С. 13-24.

[6] *Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., Lu Y.* Towards Practical Real-Time Neural Video Compression // *arXiv preprint* arXiv:2502.20762. 2025.

[7] *Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А.* Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // *Электросвязь*. 2024. № 6. С. 46-56.

[8] *Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А.* Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I // *Электросвязь.* 2024. № 6. С. 58-64.

[9] *Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А.* Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // *Электросвязь.* 2024. № 9. С. 42-51.

[10] *Березкин А.А., Паршин А.А., Лазарев А.А.* Адаптивный контроль интенсивности видеопотока при передаче FPV-трафика беспилотных систем // *Материалы 79-й научно-технической конференции СПб НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио,* Санкт-Петербург, 22–26 апреля 2024. С. 162–165.

[11] *Seo S.* A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets : дис. University of Pittsburgh, 2006.

Использование искусственных нейронных сетей в бинарной классификации ECH-трафика

К. В. Сапожников[1], А. С. Заварукин[2], А. А. Лазарев[3], А. А. Березкин[3], А. А. Ченский[1], А. С. Дюбов[3], Р. М. Вивчарь[3]

[1]Центр перспективных проектов и разработок Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия,
[2]Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Россия,
[3]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия,
Andrey.05.03.ru@mail.ru, marinheira@rambler.ru, berezkin.aa@sut.ru, stdnan@vivaldi.net, chenskii.aa@sut.ru, blip@bk.ru, vivchar.rm@sut.ru

Аннотация. *Рост использования шифрованных протоколов, таких как Encrypted Client Hello (ECH), направлен на повышение конфиденциальности пользователей, однако создаёт новые вызовы для балансировки трафика. В настоящее время в рамках анализа и классификации ECH-трафика активно применяются модели на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Актуальным становится внедрение технологий на основе ИНС в системы балансировки трафика с целью выявления целевых групп высоконагруженных серверов в структуре ECH-трафика и дальнейшего перераспределения нагрузки. В качестве анализируемого трафика были выбраны байты рукопожатия ECH, а также первые байты клиента и сервера. Разработана модель классификации байтовых последовательностей ECH-трафика переменной длины. Она сочетает свёрточные нейронные сети (CNN), остаточные блоки (Residial Block), двунаправленные LSTM (BiLSTM) и механизм Self-Attention. При обучении на байтах рукопожатия ECH были достигнуты точность на обучающей выборке 0,9944 и точность на тестовой выборке 0,8722. Таким образом, нейронная сеть с выбранной архитектурой показала хорошее качество на бинарной классификации ECH-трафика, и может быть использована на байтах рукопожатия в структуре систем балансировки трафика между целевыми группами серверов.*

I. Введение

Рост использования шифрованных протоколов, таких как Encrypted Client Hello (ECH), направлен на повышение конфиденциальности пользователей, однако создаёт новые вызовы для балансировки трафика. ECH скрывает критически важные метаданные, включая Server Name Indication (SNI), что усложняет определение групп доменов в общем трафике. Этим обусловлена необходимость разработки методов, способных анализировать зашифрованный трафик без доступа к его содержимому, сохраняя при этом высокую точность классификации. В настоящее время в рамках анализа и классификации ECH-трафика активно применяются модели на основе ИНС, которые обучаются как на статистических признаках пакетов, так и на их последовательностях в виде байтовых строк. Вместе с тем, в исследованной литературе не найдено решений по бинарной классификации ECH-трафика в интересах его маршрутизации. Таким образом, актуальным становится внедрение технологий на основе ИНС в системы балансировки трафика с целью выявления целевых групп высоконагруженных серверов в структуре ECH-трафика и дальнейшего перераспределения нагрузки.

II. Материалы и методы

В качестве анализируемого трафика были выбраны байты рукопожатия ECH, а также первые байты клиента и сервера [1]. В первом случае структура анализируемой последовательности является постоянной, тогда как в остальных различается от сессии к сессии, однако для первых порций трафика это не характерно [2]. Разработан метод бинарной классификации байтовых

последовательностей ECH-трафика на основе искусственной нейронной сети. Модель спроектирована для задач классификации байтовых последовательностей переменной длины. Она сочетает свёрточные нейронные сети (CNN), остаточные блоки (Residial Block), двунаправленные LSTM (BiLSTM) и механизм Self-Attention. Архитектура ИНС определялась по результатам анализа научной литературы по обработке последовательностей данных методами искусственного интеллекта. Были выявлены работы как по тематике анализа веб-трафика [3, 4], так и по смежным темам (NLP, молекулярная биология, медицина) [5–10]. Выявлено, что оптимальной архитектурой может являться гибридная «1dCNN+BiLSTM with self-attention». При этом, необходимость применения данных элементов в архитектуре ИНС обусловлена модальностью данных (байтовая строка), их структурой (например, строгий порядок фиксированных полей в хендшейке) и определённой задачей по классификации строк в реальном времени (что решается в том числе максимальным упрощением архитектуры нейронной сети) [3].

III. Результаты и обсуждение

Бинарный классификатор был обучен и протестирован на датасете байтовых строк с 3986 записями. Исходные данные представлены в виде двух классов с 2192 и 1794 элементами соответственно (рисунок 1).

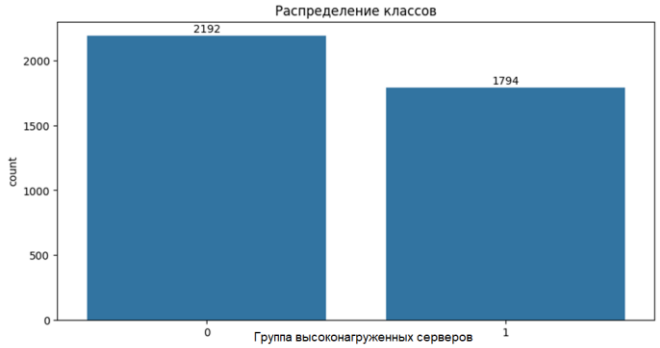


Рис.1. Распределение классов в анализируемых данных

Разделение выборок на обучающую и тестовую производилось в соотношении 9:1 при помощи функции sklearn.model_selection train_test_split с параметром test_size=0.1. Таким образом, обучающая выборка содержала в себе 3587 примеров, а тестовая 399. С помощью функции compute_class_weight библиотеки scikit-learn для классов рассчитывали веса, которые использовали в качестве параметра weight функции потерь. Обучение нейронной сети производили в интерактивной среде Jupyter Notebook, использовали фреймворки pytorch, scikit-learn. Оптимизатор: AdamW с параметрами lr=1e-4, weight_decay=1e-5, функция потерь: CrossEntropyLoss, параметры label_smoothing=0.1, weight=class_weights, планировщик learning rate: ReduceLROnPlateau с параметрами min, patience=5. Данные гиперпараметры показали лучшие результаты на данных в ходе экспериментов.

Обучение было остановлено на 60 эпохе, определены общепринятые метрики. При обучении на байтах рукопожатия ECH были достигнуты следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты обучения модели на байтах рукопожатия

Метка класса	Класс 0	Класс 1
Precision	0,8999	1,0000
Recall	1,0000	0,8588
F1	0,9608	0,9347
Specificity	0,8514	0,9771
Sensitivity	1,0000	0,8529

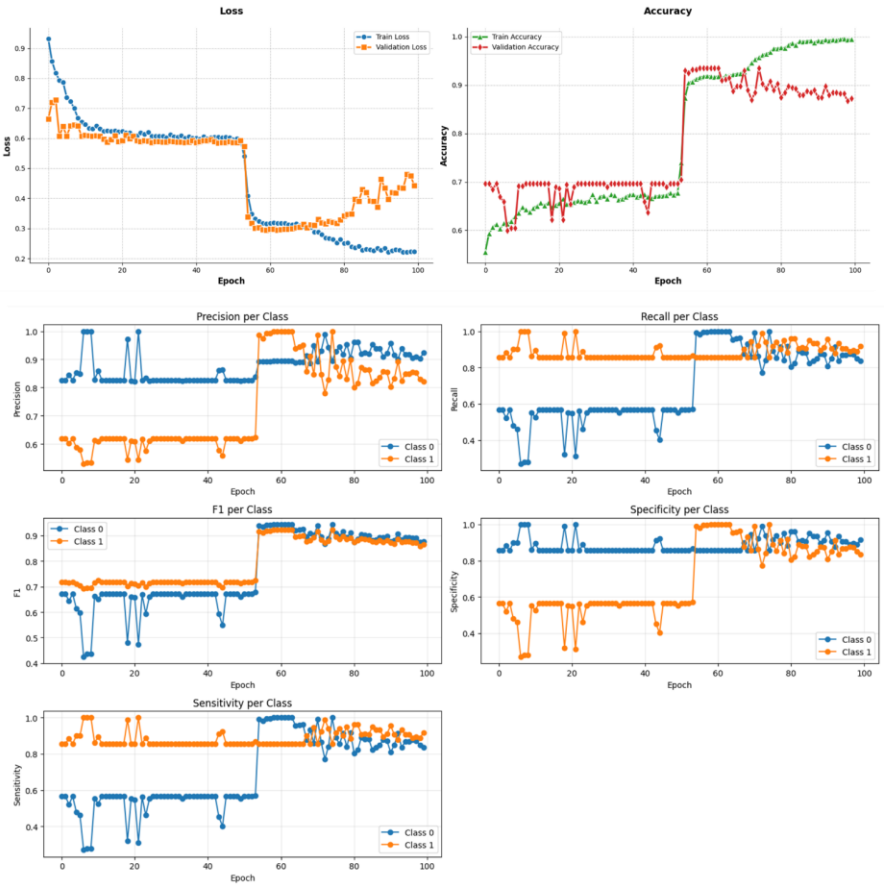


Рис.2. Результаты обучения модели на байтах рукопожатия по эпохам

Точность на обучающей выборке составила 0,92. Точность на тестовой выборке: 0,94. Динамика обучения представлена на рисунке 2.

Обучение на байтах клиента и сервера не показало значимых результатов. В первом случае точность на обучающей выборке: 0,9704, точность на тестовой выборке: 0,7469. Во втором: точность на обучающей выборке: 0,9858, на тестовой: 0,7143.

IV. Заключение

Нейронная сеть с выбранной архитектурой показала хорошее качество на бинарной классификации ECH-трафика, и может быть использована на байтах рукопожатия в структуре систем балансировки трафика между целевыми группами серверов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области разработки методов мониторинга и идентификация типов трафика для эффективного использования сетевого ресурса в гибридных сетях связи" (регистрационный номер ПТНИ: 1024062100008-4).

Литература

[1] *D. Shamsimukhametov, A. Kurapov, M. Liubogoshchev, E. Khorov* “Early Traffic Classification With Encrypted ClientHello: A Multi-Country Study” *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. pp. 142979–142993.

[2] *D. Shamsimukhametov, A. Kurapov, M. Liubogoshchev & E. Khorov* “Is Encrypted ClientHello a Challenge for Traffic Classification?” *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. pp. 77883–77897.

[3] *T. Sasi, A. Habibi Lashkari, R. Lu, P. Xiong, S. Iqbal* “An Efficient Self Attention-Based 1D-CNN-LSTM Network for IoT Attack Detection and Identification Using Network Traffic” *Journal of Information and Intelligence*. 2024.

[4] *K. Wang, C. Ma, Y. Qiao, X. Lu, W. Hao, S. Dong* “A Hybrid Deep Learning Model with 1DCNN-LSTM-Attention Networks for Short-Term Traffic Flow Prediction” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021. Vol. 583. p. 126293.

[5] *H. Li, W. Zhao, J. Wang, Z. Sun, J. Ren, B. Zhang, Z. Luan, Z. Yu* “A Convolutional Neural Network Based on Self-Attention Mechanism for Molecular Property Prediction Using Molecular Hidden Fingerprints: An efficient molecular property prediction method” *Proceedings of the 2021 10th International Conference on Networks, Communication and Computing*. 2022. pp. 1–7.

[6] *S. Raikwar, A. Mayuri* “Self-attention-based 1DCNN model for multiclass EEG emotion classification” *The Journal of Supercomputing*. 2025. Vol. 81. p. 520.

[7] *P. Bhuvaneshwari, A. Rao, Y. Robinson* “Sentiment Analysis for User Reviews Using Bi-LSTM Self-Attention Based CNN Model” *Multimed Tools Appl*. 2022. Vol. 81. pp. 12405–12419.

[8] *R. Kirichek, M. Golubeva, V. Kulik, A. Koucheryavy* “The home network traffic models investigation” *2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT),* Pyeongchang, South Korea. Vol. 2016. – Pyeongchang, South Korea: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. – P. 97-100. – DOI 10.1109/ICACT.2016.7423288.

[9] *R. Pirmagomedov, M. Blinnikov, R. Glushakov* “Dynamic Data Packaging Protocol for Real-Time Medical Applications of Nanonetworks” *Lecture Notes in Computer Science*. – 2017. – Vol. 10531. – P. 196-205. – DOI 10.1007/978-3-319-67380-6_18.

[10] *R. Kirichek, V. D. Pham, A. Kolechkin* “Transfer of Multimedia Data via LoRa” Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10531. – P. 708-720. – DOI 10.1007/978-3-319-67380-6_67.

5G MIMO CSI Data compression methods

D.R. Lysenko, V.O. Piskovski
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,
dlysenko@asvk.cs.msu.ru, vpiskovski@asvk.cs.msu.ru

***Abstract**. Fifth-generation 5G NR communication systems use antenna arrays for directional transmission and reception, which, in turn, contributes to increased communication productivity and efficiency. For duplex systems with frequency division of channels, feedback about the channel status is important. The code page for the configuration of the base station's antenna array and the antenna ports of the client device is selected by the exchange of messages. The report is intended to work out the optimal the exchange procedure, apply and study data compression methods.*

I. Introduction

In MIMO (Multiple Input Multiple Output) systems, information about the channel State Information (CSI) at the base station is necessary to ensure high-quality operation of precoding and antenna array settings during beam formation. However, as the number of base station antennas is increased, the size of messages providing feedback becomes a challenge due to the CSI matrix size growth.

It is necessary to effectively compress channel status information on user equipment before transmission and reconstruct it at the base station. The CSI matrix contains a large number of elements close to zero. This is due to the sparseness in the MIMO channels, which can be used for compression. In [1, 2], the matrix is modified using the discrete Fourier transform, and the sparsity is preserved in this region. Given that the time delays between the signals are in a limited range, only some lines contain values that are not close to zero, the rest can be ignored.

Algorithms from the field of image compression and matrix dimensionality reduction have been proposed based on: Discrete Fourier Transform (DFT); Discrete Wavelet Transform (DWT) based on Daubechy wavelets; Singular Value Decomposition (SVD)

II. Existing solutions

Many of the advantages achieved by using MIMO systems depend on the accuracy of channel status information at the transmitter (base station), which is usually obtained by evaluating it at the receiver (or an edge point terminal) and transmitting it back to the transmitter. The overhead of CSI feedback takes up significant uplink bandwidth resources, especially with a large number of transmitting antennas. The article [1] proposed feedback based on deep Learning (DL), CSI compression and recovery using an autoencoder, which can significantly reduce the overhead of feedback.

III. Experiments description

Data for research and analysis of communication channels is often obtained either by computer modeling using specialized tools, or by making real measurements in an appropriate environment.

We propose the use of methods to compress data and matrix dimensionality reduction at beam forming processes including the exchange of SCI reports.

In experiments, we can preserve the largest elements of the channel matrix. The difference between the reconstructed channel and the input channel can be determined using the normalized MSE, measured in dB, correlation (cosine similarity) and signal-to-noise ratio, measured in dB.

As an additional experiment, a comparison of matrix compression using the SVD method in the Fourier domain with the channel matrix can be performed as well.

1. Most methods achieve NMSE values of about 20 dB while maintaining 10-20% of the data. Methods based on DFT and DWT will allow defining the lowest NMSE values at the same level of data retention, which indicates their high efficiency in signal recovery.

2. As expected, for all methods, the SNR ratio deteriorates by approximately 1 dB or less, with a data retention rate of about 10%.
3. Also our expectations are that DFT methods can present the best results, achieving low SNR values with a small percentage of data retention.
4. From the other side seemingly all methods achieve a correlation coefficient close to 1, with a data retention rate of about 10-20%.
5. Thus DFT and DWT methods achieve high correlation values faster than other methods, which indicates their high efficiency.

IV. Results and conclusion

Data compression methods based on discrete Fourier transform, singular value decomposition, and discrete wavelet transform definitely demonstrate acceptable signal recovery characteristics at different compression levels. Say, the DFT and SVD methods show NMSE values of about 20-30 dB while preserving 10-30% of the data, while the SNR ratio deteriorates by about 1 dB, which is a good indicator of the quality of recovery.

References

[1] *Wen C.-K., Shih W.-T., and Jin S.,* Deep learning for massive MIMO CSI feedback // *IEEE Wireless Communications Letters.* 2018. 7. N 5. P. 748#751.

[2] *Guo J., Wen C.-K., Jin S, and Li G.Y.,* Overview of deep learning-based CSI feedback in massive MIMO systems // *IEEE Transactions on Communications*., 2022. 70. N 12. P. 8017#8045.

[3] *Wang T., Wen C.-K, Jin S., and Li G.Y.,* Deep learning-based CSI feedback approach for time-varying massive MIMO channels // IEEE Wireless Communications Letters. 2018. 8 . N 2. P. 416#419.

[4] *Mourya S., Amuru S., and Kuchi K.K.* Multi-Task Learning for Multi-User CSI Feedback // arXiv preprint arXiv:2211.08173. 2022. 11

[5] *Han X., Wang Z. , Li D., Tian W., Liu X., Liu W., Jin S., Jia S., Zhang Z., and Yang N.* AI enlightens wireless communication: A transformer backbone for CSI feedback //*China Communications*, 2024.

[6] 3GPP, 5G System Overview. URL: *https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview*

3GPP, Release 18. URL: https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-18.

[7] GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical layer procedures for data. URL: *https://atisorg.s3.amazonaws.com/archive/3gppdocuments/Rel16/ATIS.3GPP.38.214.V1620.pdf*

[8] *Sun Y., Xu W., Liang L., Wang N., Li G.Y., and You X.,* A lightweight deep network for CSI feedback in massive MIMO systems.// *IEEE Wireless Communications Letters.* 2021. 10. N 8. P. 1840#1844.

Защита от side-channel атак в микропроцессорах

Д. А. Защепко, С. Н. Барсукевич, И. С. Тарасюк
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Беларусь,
zashchepko1337@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматриваются актуальные методы защиты микропроцессоров от побочных атак (side-channel attacks), позволяющих злоумышленникам извлекать критически важные данные (криптографические ключи, пароли) через косвенные каналы утечки информации. Проводится анализ современных контрмер, включая: атаки по анализу энергопотребления, в частности методы балансировки мощности на основе двухрельсовой логики и технологии WDDL; атаки по времени, где ключевое значение имеют константно-временные алгоритмы; а также атаки через кэш-память, для защиты от которых применяются механизмы разделения ресурсов с блокировкой и динамической очисткой. Особое внимание уделяется комплексным решениям, сочетающим программные и аппаратные подходы для обеспечения максимального уровня безопасности микропроцессоров и обрабатываемых ими данных.*

I. Введение

Побочные атаки – атаки, ориентирующиеся на получение косвенной информации о работе системы через сторонние каналы утечки, которые не были предусмотрены дизайном системы изначально. Такие атаки позволяют злоумышленникам извлекать секретные данные (ключи шифрования, пароли) без прямого взлома алгоритмов. При этом имеется множество способов проведения данных атак, например, при помощи измерения времени выполнения операций, анализа потребляемой мощности, регистрации электромагнитных наводок или использования кэш-памяти для извлечения данных [1].

Такие виды атак, как Spectre или Meltdown, которые используют уязвимости в спекулятивном выполнении команд процессоров Intel, AMD и ARM для того, чтобы считывать данные из кэш-памяти, представляют серьёзную угрозу для безопасности передаваемых данных в различных устройствах [2]. Для того, чтобы противостоять подобным атакам были разработаны методы защиты и контрмеры, которые и станут объектами исследования в настоящей работе.

II. Исследование методов защиты от побочных атак по времени выполнения

Атаки по времени относятся к классу атак, где злоумышленник анализирует время выполнения операций в системе для извлечения конфиденциальных данных. Эти атаки основаны на том, что время работы определённого алгоритма, например, AES или RSA, может зависеть от обрабатываемых данных или состояния системы. Так атакующий может многократно запускать целевую операцию с разными входными данными и замерять время её выполнения, после чего становится возможным восстановление секретных данных.

Одним из наиболее общих решений по защите от атак по времени выполнения разных операций является использование константно-временных методов. Суть этих методов заключается в создании алгоритмов, в которых время выполнения операций не зависит от обрабатываемых данных. На программном уровне это возможно реализовать несколькими способами, например, путём создания сегментов кода без ветвлений, зависящих от секретных данных, или создания циклов с фиксированным временем выполнения. Основным недостатком такого метода является увеличение времени выполнения из-за замены оптимизированных алгоритмов на более безопасные, а также необходимая поддержка на разных аппаратных платформах [3].

На аппаратном уровне же решением по защите от временных атак является исключение использования уязвимых Lookup-таблиц для реализации важных криптографических примитивов, что позволит добиться константно-временного выполнения операций. Многие современные x86-

процессоры включают специализированные наборы инструкций для безопасного выполнения криптографических операций, таких как AES-шифрование, расшифровка, генерация ключей и других. Среди процессоров, поддерживающих расширенные наборы инструкций, можно выделить решения от Intel, AMD и IBM.

III. Исследование методов защиты от побочных атак по энергопотреблению

Атаки по энергопотреблению относятся к классу атак, в которых злоумышленник анализирует изменения в энергопотреблении устройства во время выполнения криптографических операций для извлечения секретных данных. Эти атаки особенно эффективны против встроенных систем, где энергопотребление напрямую связано с выполняемыми операциями. Атаки данного типа подразделяются на два вида, в зависимости от способа анализа: простые атаки по мощности, при которых полученная информация о потреблении энергии процессором сравнивается напрямую с образцами, и дифференциальные, при которых происходит анализ множества замеров мощности для выделения корреляции между данными и ключом.

Защита против атак, проводящихся при помощи дифференциального анализа потребляемой мощности, может быть реализована в виде добавления шума в силовые линии, при этом шум может генерироваться естественно случайным образом [4]. Это приводит к тому, что проводить атаки над микропроцессором становится сложнее, из-за увеличения объёма образцов мощностей.

На программном уровне условное выполнение также является уязвимым местом для атак подобного рода. Такие уязвимости можно предотвратить путём модификации или замены существующего кода на новый алгоритм, выполняющий ту же задачу. Например, возможна замена обычного алгоритма операции двойного сложения и добавления на версию Монтгомери, имеющую одинаково эффективные сегменты кода при условном выполнении.

Алгоритмическая балансировка также может быть возможной контрмерой для атак, основывающихся на анализе мощности [5]. Её суть заключается в модифицировании кода таким образом, чтобы биты данных слов имели также и их дополнения. Однако наиболее эффективным решением является балансировка на аппаратном уровне, путём создания двухрельсовой логики, в которой два вентиля балансируют друг друга входными и выходными битами [6]. На основе двухрельсовых схем предварительной зарядки разработан такой метод защиты, как технология волновой динамической дифференциальной логики (англ. wave dynamic differential logic, WDDL), с помощью которой можно достигнуть энергопотребления постоянного уровня. Стоит отметить, что большим недостатком данной технологии является увеличение площади кристалла в два или более раза.

IV. Исследование методов защиты от побочных атак с использованием кэш-памяти

Атаки по побочным каналам кэша имеют схожий принцип работы с атаками, в которых измеряется время работы определённого алгоритма. Такие атаки основаны на том, что время доступа к данным в кэше и основной памяти различается, и злоумышленник может использовать эту разницу для получения секретных данных. Эти атаки особенно опасны в облачных средах и системах с общей памятью, где несколько процессов используют одни и те же кэш-линии.

Одним из методов защиты от данного типа атак является разделение ресурсов кэша между задачами, ядрами или пользователями для того, чтобы предотвращать конфликты ресурсов [7]. Однако стандартное разделение кэша сохраняет уязвимость, позволяющую злоумышленнику получать доступ к критическим данным через конфликты в отдельных сегментах разделённого кэш-пространства. Возможным решением данного недостатка является введение в разделы кэша механизма блокировки. Этот метод можно скомбинировать с техникой “прогрева” кэша, при которой кэш предварительно загружается данными до начала шифрования, благодаря чему не будет промахов и колебаний во время доступа. Примерами реализации технологии разделения кэша могут выступать Intel Cache Allocation Technology (CAT) или ARM Memory System Resource Partitioning and Monitoring (MPAM).

Другим методом защиты от атак с использованием кэш-памяти является динамическая очистка кэша, в которой кэш сбрасывается через случайные промежутки времени с целью запутать атакующего [8]. При этом возможно и отключение очистки кэша для того, чтобы не позволить злоумышленнику взять под контроль пустой кэш. В таком случае искажение во времени работы позволит изменять синхронизацию случайным образом.

Ещё одним способом защиты кэша может быть увеличение кэш-линий таким образом, чтобы они могли содержать в себе больше одного адреса, запутывая атакующего.

V. Перспективы развития будущих исследований

Side-channel атаки всё ещё остаются критической угрозой для безопасности микропроцессоров, особенно в эпоху облачных вычислений и квантовых технологий. Несмотря на значительный прогресс в развитии контрмер, злоумышленники продолжают выявлять новые векторы атак, эксплуатируя уязвимости в алгоритмах постквантовой криптографии [9] или в спекулятивном выполнении команд у некоторых процессоров. А бурное развитие в методах машинного обучения может стать темой изучения при их применении как в атаках по побочным каналам, так и в качестве полезного инструмента для анализа в проектировании более безопасных систем в будущем, например, для анализа аномалий в потреблении мощности. Уже сегодня можно встретить применение открытой библиотеки SCALib (Side-channel attack Library), разработанной для анализа side-channel утечек, совместно с алгоритмами машинного обучения для предобработки данных.

VI. Заключение

Внедрение вышеописанных методов как на программном, так и на аппаратном уровне может значительно повысить безопасность устройств от побочных атак и в некоторых случаях является необходимостью. Например, для защиты от атак типа Flush+Reload и Spectre в облачных сервисах таких, как AWS EC2, широко используются процессоры Intel Xeon Scalable, в которых применяется технология Intel CAT. А для обеспечения безопасных транзакций через банковские карты Visa PayWave и MasterCard Contactless применяют специальные чипы NXP SmartMX, в которых применяется технология WDDL для реализации алгоритмов криптографии.

Необходимо подчеркнуть, что наибольшая эффективность контрмер проявляется при их совмещении как на аппаратном, так и на программном уровне. Для наибольшей защиты в системах могут совмещаться технология WDDL, константно-временные методы программирования и разделение кэша. Однако существенным недостатком внедрения данных технологий является большая сложность проектирования, увеличение цены и снижение производительности по сравнению с менее безопасными системами.

Литература

[1] *J. A. Ambrose, R. G. Ragel, D. Jayasinghe, T. Li and S. Parameswaran*, "Side channel attacks in embedded systems: A tale of hostilities and deterrence," *Sixteenth International Symposium on Quality Electronic Design*, Santa Clara, CA, USA, 2015, pp. 452-459.

[2] *E. M. Koruyeh, K. N. Khasawneh, C. Song and N. Abu-Ghazaleh*, "Spectre Returns! Speculation Attacks Using the Return Stack Buffer," *in IEEE Design & Test*, vol. 41, no. 2, April 2024, pp. 47-55.

[3] *Qian Ge, Yuval Yarom, David A. Cock, Gernot Heiser*, “A survey of microarchitectural timing attacks and countermeasures on contemporary hardware,” *Journal of Cryptographic Engineering*, vol. 8, 2018, pp. 1-27

[4] *P. Kocher, J. Jaffe, and B. Jun*, “Differential Power Analysis,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1666, pp. 388–397, 1999.

[5] *J. Daemen, V. Rijmen*. “Resistance against implementation attacks A comparative study of the AES proposals,” *Proceedings of the second AES Candidate Conference*, March 1999, pp. 122-132.

[6] *J. Waddle and D. Wagner*, "Fault attacks on dual-rail encoded systems," *21st Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC'05)*, Tucson, AZ, USA, 2005, pp.484-494.

[7] *Z. Wang and R. B. Lee*, “New Cache Designs for Thwarting Software Cache-based Side Channel Attacks,” in *ISCA*, 2007, pp. 494–505.

[8] *J. Bani and S. S. Rizvi*, "A New Dynamic Cache Flushing (DCF) algorithm for preventing cache timing attack," 2008 *Wireless Telecommunications Symposium, Pomona*, CA, USA, 2008, pp. 399-404.

[9] *Erata, F., Xu, C., Piskac, R., & Szefer, J.,* "Quantum Circuit Reconstruction from Power Side-Channel Attacks on Quantum Computer Controllers," *IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*, vol. 2, 2024, pp. 735-768.

Successive convex approximation for enhancing federated learning over GEO satellite networks

Phuc Hao Do[1], Tran Duc Le[2], A. Berezkin[1], R. Kirichek[1]
[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia,
[2]University of Wisconsin-Stout, Menomonie, Wisconsin, USA,
do.hf@sut.ru, let@uwstout.edu, aa.berezkin@mail.ru, kirichek@sut.ru

Abstract. *Federated Learning (FL) in GEO satellite networks faces challenges due to high communication latency and limited bandwidth. This paper proposes a Successive Convex Approximation (SCA) approach for client selection to optimize FL performance, balancing latency reduction with model accuracy. By formulating client selection as a multi-objective optimization problem, SCA iteratively solves convex subproblems to select clients based on accuracy, bandwidth, and delay metrics. This mitigates GEO network delays, ensuring efficient model aggregation. Experiments on standard datasets show that SCA outperforms random and greedy selection, significantly reducing latency while maintaining high accuracy and faster convergence. The method's robustness across diverse data distributions suits applications like remote sensing and disaster response. Future work includes quantization techniques, real satellite testbeds, and adaptive parameter weighting for improved client diversity.*

I. System Model and Problem Formulation

We consider a federated learning [1] system comprising a central server, implemented on a GEO satellite [2], and a set of N ground clients, denoted by $\mathcal{N} = \{1,2,\dots,N\}$. In each communication round t, the server selects a subset $\mathcal{S}_t \subseteq \mathcal{N}$ of K clients to perform local training and model aggregation. Each client $i \in \mathcal{N}$ possesses a local dataset $\mathcal{D}_i$ and communicates with the server over a wireless link characterized by bandwidth b_i (in Mbps) and propagation delay d_i (in ms), reflecting typical GEO satellite network conditions. The objective is to minimize the total communication delay per round while ensuring high global model accuracy. To achieve this, we formulate a multi-objective client selection problem that balances communication delay, data quality, and model accuracy. The total transmission delay for client i, denoted τ_i, accounts for both the time to transmit the model and the propagation delay: $\tau_i = \frac{S}{b_i} + d_i$, where S is the model size (in MB), assumed constant across clients. To incorporate multiple objectives, we define a scoring function for each client i that combines accuracy, bandwidth, and delay: $\phi_i = \alpha \cdot \hat{a}_i + \beta \cdot \hat{b}_i - \gamma \cdot \hat{d}_i$ where:

- $\hat{a}_i = \frac{a_i - \min_j a_j}{\max_j a_j - \min_j a_j}$ is the normalized accuracy contribution, with a_i representing the local training accuracy (e.g., inverse of local loss) of client i.
- $\hat{b}_i = \frac{b_i - \min_j b_j}{\max_j b_j - \min_j b_j}$ is the normalized bandwidth.
- $\hat{d}_i = \frac{d_i - \min_j d_j}{\max_j d_j - \min_j d_j}$ is the normalized delay.
- $\alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$ are weighting parameters satisfying $\alpha + \beta + \gamma = 1$, allowing trade-offs between accuracy, bandwidth, and delay.

The client selection problem is formulated as:

$$\begin{aligned} \underset{\mathcal{S}_t \subseteq \mathcal{N}}{\text{maximize}} \quad & \textstyle\sum_{i \in \mathcal{S}_t} \phi_i \\ \text{subject to} \quad & |\mathcal{S}_t| = K \\ & \textstyle\sum_{i \in \mathcal{S}_t} \tau_i \le T_{\max} \end{aligned} \tag{1}$$

where $T_{\max}$ is the maximum allowable total delay per round, ensuring timely model aggregation in latency-sensitive GEO networks.

To solve the optimization problem in (1), we propose a Successive Convex Approximation [3] methodology that efficiently selects K clients per round while balancing accuracy and communication delay. The method involves relaxing the combinatorial constraints, smoothing the objective function, and iteratively optimizing a convex surrogate function. The discrete constraint $\mathcal{S}_t \subseteq \mathcal{N}$ with $|\mathcal{S}_t| = K$ is equivalent to introducing binary variables $x_i \in \{0,1\}$, where $x_i = 1$ if client $i \in \mathcal{S}_t$ and $x_i = 0$ otherwise. We relax $x_i \in \{0,1\}$ to $x_i \in [0,1]$ to obtain a continuous optimization problem:

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{x}}{\text{maximize}} \ & \textstyle\sum_{i=1}^{N} x_i \phi_i \\ \text{subject to} \ & \textstyle\sum_{i=1}^{N} x_i = K \\ & \textstyle\sum_{i=1}^{N} x_i \tau_i \le T_{\max} \\ & 0 \le x_i \le 1, \forall i \in \{1, \dots, N\} \end{aligned} \tag{2}$$

where $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ is the selection vector, and ϕ_i is computed after normalizing a_i, b_i, and d_i based on their minimum and maximum values across all clients.

The objective $\sum_{i=1}^{N} x_i \phi_i$ is linear, and the constraints are linear, making (2) a convex problem. However, to ensure numerical stability and handle potential non-linearities in practical implementations (e.g., variations in ϕ_i due to dynamic network conditions), we apply SCA to iteratively refine the solution. The SCA approach constructs a sequence of convex subproblems [4] to approximate the solution of (2). At each iteration t, we solve a convex subproblem based on the current solution $\mathrm{x}^{(t)}$:

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{x}}{\text{maximize}} \ & \textstyle\sum_{i=1}^{N} x_i \phi_i^{(t)} \\ \text{subject to} \ & \textstyle\sum_{i=1}^{N} x_i = K \\ & \textstyle\sum_{i=1}^{N} x_i \tau_i \le T_{\max} \\ & 0 \le x_i \le 1, \forall i \in \{1, \dots, N\} \end{aligned} \tag{3}$$

where $\phi_i^{(t)}$ is the score at iteration t, updated based on the latest estimates of a_i, b_i, and d_i. To account for dynamic network conditions, we recompute $\phi_i^{(t)}$ using: $\phi_i^{(t)} = \alpha \cdot \hat{a}_i^{(t)} + \beta \cdot \hat{b}_i^{(t)} - \gamma \cdot \hat{d}_i^{(t)}$, where $\hat{a}_i^{(t)}, \hat{b}_i^{(t)}$, and $\hat{d}_i^{(t)}$ are normalized using the current round's measurements.

Let $t \in \{0,1, \dots, T-1\}$ index the communication rounds, and let $\mathcal{C}$ be the set of all on-ground clients with $|\mathcal{C}| = N$. The GEO server holds the round- t global model $w^{(t)} \in \mathbb{R}^d$; each client i possesses a private dataset D_i of size $|D_i|$. The complete control loop for one round consists of seven ordered phases, summarized in Fig. 1 and formalized below. Figure 1 illustrates the execution flow of these phases, detailing the interaction between the GEO satellite and the clients.

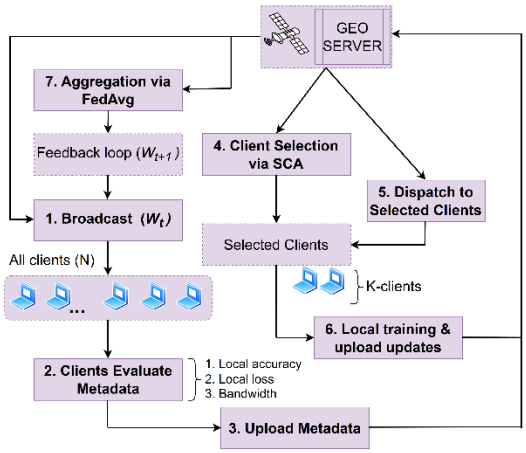


Fig. 1: Execution flow of one FL round with SCA on the GEO satellite

Round-Flow Recap: The following outlines the sequence of operations in one federated learning (FL) round, highlighting the interplay between communication and computation phases, as depicted in Fig. 1.

1. $w^{(t)} \downarrow$ to all clients
2. Clients compute metadata
3. Metadata $\uparrow$ to GEO
4. SCA + LP $\Rightarrow$ subset $\mathcal{S}^{(t)}$
5. $w^{(t)} \downarrow$ to $\mathcal{S}^{(t)}$
6. Training, updates $\uparrow$
7. FedAvg [5] $\Rightarrow w^{(t+1)}$

This tightly couples communication awareness and statistical efficiency, ensuring that every round respects both latency and accuracy constraints while maximizing the GEO downlink's global utility.

II. Experimental Results

To evaluate the performance of the SCA, GREEDY, and RANDOM strategies in federated learning, four distinct visualizations are presented to analyze server accuracy and total delay across 50 rounds. Figure 2 presents a radar chart comparing server accuracy for the SCA, GREEDY, and RANDOM strategies across selected rounds (1,10,20,30,40, and 50). The SCA strategy starts with a higher accuracy (0.6575 in Round 1) compared to GREEDY (0.2783) and RANDOM (0.4912), indicating faster initial convergence. By Round 50, all strategies achieve accuracies around 0.98 , as shown by the closely aligned areas, suggesting comparable final performance.

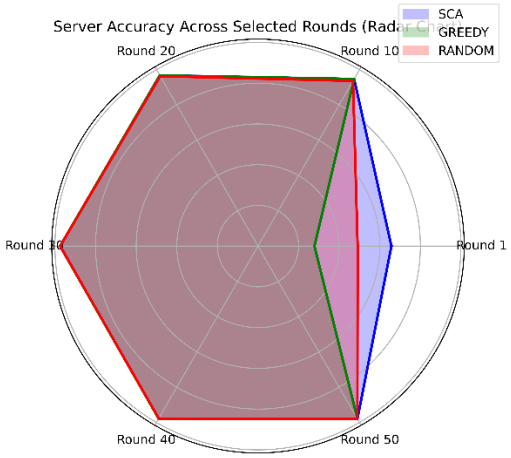
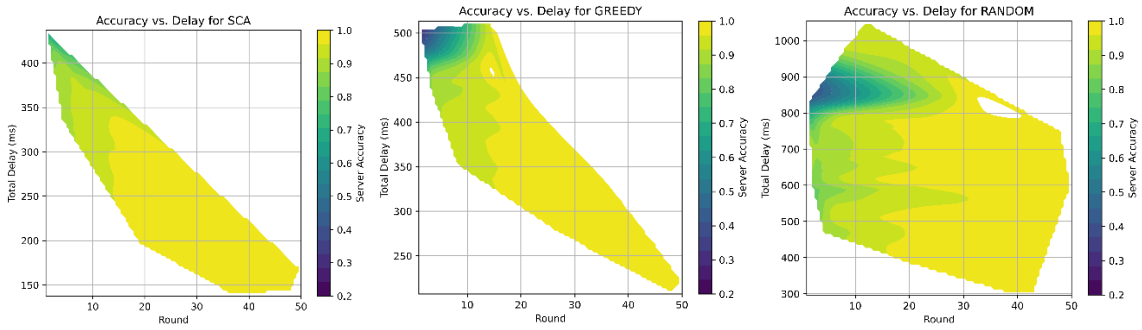


Fig. 2: Comparing server accuracy across selected rounds
for SCA, GREEDY, and RANDOM strategies

Figure 3 comprises contour plots illustrating server accuracy as a function of round and total delay for each strategy, with the accuracy scale extending to 1.0 for clarity. For SCA (Fig. 3a), high accuracy (above 0.95) is achieved with lower delays (below 200 ms) in later rounds, demonstrating efficient client selection. GREEDY (Fig. 3b) follows a similar trend but with higher delays in early rounds. RANDOM (Fig. 3c) shows a scattered pattern, with high delays (e.g., 1054.2 ms in Round 12) corresponding to slower accuracy improvements, reflecting inconsistent client selection.



(a) : SCA (b) : GREEDY (c) : RANDOM

Fig. 3: The server accuracy as a function of round and total delay for each strategy, with accuracy ranging up to 100%.

Figure 4 presents a line plot showing server accuracy over 50 rounds for SCA, GREEDY, and RANDOM strategies. The SCA method, depicted with blue circles, exhibits a steep initial accuracy increase, reaching 0.8056 by Round 2, which reflects its effective client selection strategy. Notably, SCA selects only $K = 4$ clients per round from $N = 10$, yet achieves a high average accuracy of 94.47% (Table II), comparable to GREEDY (92.88%) and RANDOM (94.40%). In contrast, GREEDY, shown with green squares, starts with a lower accuracy of 0.2783 in Round 1 but catches up by Round 10, while RANDOM, represented by red triangles, demonstrates a moderate initial performance of 0.4912 with gradual improvement. Table 1 presents the average server accuracy and total delay, along with their standard deviations, for the SCA, GREEDY, and RANDOM strategies over 50 rounds. The SCA strategy achieves the highest average accuracy of 94.47% with a standard deviation of 5.67%, indicating stable and high performance throughout the training process. Its average delay is the lowest at 245.53 ms with a standard deviation of 92.08 ms , reflecting efficient and consistent communication.

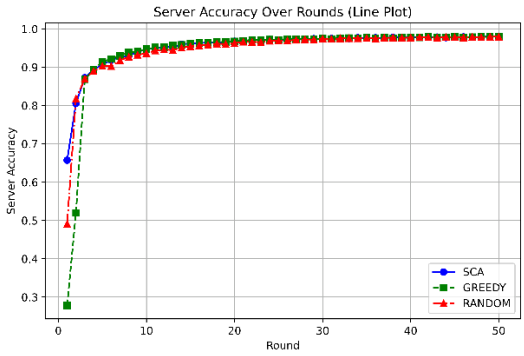


Fig. 4: The server accuracy over rounds for SCA, GREEDY, and RANDOM strategies

In contrast, GREEDY records a slightly lower average accuracy of 92.88% with a higher standard deviation of 14.30%, suggesting greater variability, particularly in early rounds due to its initial low accuracy (e.g., 27.83% in Round 1). GREEDY's average delay is 335.17 ms with a standard deviation of 91.67 ms , indicating moderate communication efficiency. The RANDOM strategy achieves an average accuracy of 94.40%, close to SCA, but with a standard deviation of 9.17%, and a significantly higher average delay of 619.39 ms with a standard deviation of 189.43 ms , highlighting its inconsistency due to random client selection. These results demonstrate SCA's superior balance of high accuracy and low, stable delays, making it the most effective strategy in this federated learning context.

Table 1. Performance Metrics Across 50 Rounds for SCA, GREEDY, and RANDOM Strategies

Strategy	Accuracy (%)	Delay (ms)
SCA	94.47±5.67	245.53±92.08
GREEDY	92.88±14.30	335.17±91.67
RANDOM	94.40±9.17	619.39±189.43

III. Conclusion

This paper presents an SCA-based client selection method tailored for federated learning in GEO satellite networks, effectively addressing the challenge of high communication latency while preserving model accuracy. By formulating client selection as a multi-objective optimization problem, the proposed method leverages Successive Convex Approximation to select a subset of clients, optimizing a scoring function that balances accuracy, bandwidth, and delay. Experimental results demonstrate that SCA achieves high accuracy comparable to baseline strategies like GREEDY and RANDOM, while significantly reducing communication latency, making it well-suited for latency-constrained GEO environments. The method's rapid convergence and robust performance across diverse datasets further highlight its effectiveness for distributed learning applications such as remote sensing or disaster response. Future work will explore integrating quantizationinspired techniques to further reduce communication overhead and testing the SCA method on real GEO satellite testbeds to validate its performance under dynamic network conditions.

AcknowledgEment

The scientific article was prepared within the framework of applied scientific research SPbSUT, registration number 1024032900105-1-2.2.4;2.2.5;2.2.6 in the information system (https://www.rosrid.ru/information).

References

[1] *Chen, Mingzhe, et al.* ”Communication-efficient federated learning.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.17 (2021): e2024789118.

[2] *Zuo, Peiliang, et al.* ”Resource allocation for cognitive satellite communications downlink.” *IEEE access* 6 (2018): 75192-75205.

[3] *Liu, Xinfu, Ping Lu, and Binfeng Pan.* ”Survey of convex optimization for aerospace applications.” *Astrodynamics* 1 (2017): 23-40.

[4] *Zaslavski, Alexander J.* "Subgradient projection algorithms and approximate solutions of convex feasibility problems." *Journal of Optimization theory and Applications* 157 (2013): 803-819.

[5] *Xing, Shuaikun, et al.* ”N-fedavg: Novel federated average algorithm based on fedavg.” *2022 14th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. IEEE, 2022.

Исследование эффективности помехоустойчивости комбинации сверточного кодирования Витерби с STBC для систем MIMO

Нгием Ван Донг
Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия

***Аннотация**: Работа посвящена оценке помехоустойчивости MIMO-системы, в которой пространственно-временной блочный код Аламути сочетается со свёрточным кодированием и декодером Витерби. Предлагаемая архитектура объединяет пространственную диверсификацию с временной избыточностью, что позволяет одновременно бороться как с мультипутевыми замираниями, так и с аддитивным шумом. Полученные результаты указывают на высокую перспективность предложенного решения для систем связи пятого поколения и Wi-Fi 6/7.*

I. Введение

В современных систем беспроводной связи (LTE, 5G, Wi-Fi), требующих высокой надёжности и скорости, технология MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [1] в сочетании с пространственно-временным кодированием, таким как STBC, доказала свою эффективность в использовании пространственного разнесения [1,2,3]. Однако в условиях каналов с сильными помехами и замираниями дополнительное сочетание с канальным кодированием, например, свёрточными кодами, может дополнительно повысить производительность системы [3]. В данной статье проводим исследование эффективности помехоустойчивости комбинации сверточного кодирования с STBC для систем MIMO.

II. Предлагаемая структура

Рисунок 1 иллюстрирует общую блок-схему MIMO 2×2, использующей пространственно-временное блочное кодирование STBC и свёрточное кодирование с декодированием Витерби. Двоичные данные поступают в блок свёрточного кодирования для повышения помехоустойчивости. Затем сигнал модулируется и подаётся в блок кодирования STBC (например, код Аламути) для распределения по двум передающим антеннам (Tx1,Tx2). Канал передачи моделируется как канал с аддитивным белым гауссовским шумом с матрицей канала H и двумя приёмными антеннами (Rx1 и Rx2). На приёмной стороне сигнал подвергается декодированию STBC, демодуляции и, наконец, декодированию с помощью алгоритма Витерби для восстановления исходной битовой последовательности.

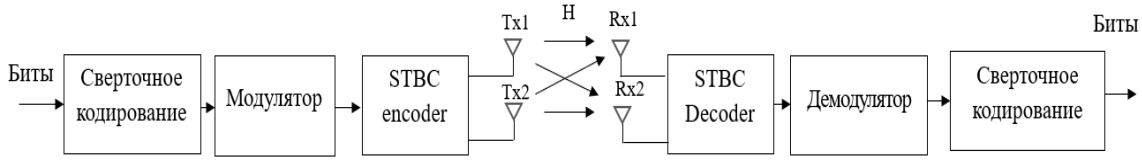


Рис. 1. Структурная схема системы MIMO 2×2
с комбинацией STBC и свёрточного кодирования

STBC [2,3] это метод линейного кодирования, распределяющий сигнал одновременно в пространственной области и во временной области. STBC является идеальным решением для систем, требующих низкой вычислительной сложности, но нуждающихся в высокой эффективности разнесения. Ключевые преимущества STBC включают: возможность достижения пространственного разнесения без увеличения передаваемой мощности, поддержку простого декодирования за счёт методов линейного декодирования и гибкую совместимость с распространёнными методами модуляции (QPSK, QAM).

В конфигурации MIMO 2×2 код Аламути считается наиболее характерным примером STBC. Для пары входных символов s1 и s2 блок кодирования Аламути представляется в виде передаточной матрицы.

$$X = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

Принятый сигнал на приёмной антенне описывается следующим образом:

$$R = H * X + n \quad (2)$$

Где, $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ – Матрица канала, n – белый гауссовский шум, $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$

Принятый символ описывается следующим образом:

$$\hat{s}_1 = h_{11}^* r_{11} + h_{21}^* r_{21} + h_{12} r_{12}^* + h_{22} r_{22}^* \quad (3)$$

$$\hat{s}_2 = h_{12}^* r_{11} + h_{22}^* r_{21} - h_{11} r_{12}^* - h_{21} r_{22}^* \quad (4)$$

Полученные оценки $\hat{s}_1, \hat{s}_2$ затем демодулируются для восстановления исходной битовой последовательности. Код Аламоути обеспечивает эффективное разделение символов и устойчивость к замираниям канала, не увеличивая вычислительную сложность.

III. Свёрточное кодирование и декодирование Витерби

Свёрточное кодирование [4,5] относится к классу помехоустойчивых кодов с памятью, в которых выходная последовательность формируется на основе текущего входного бита и ограниченного числа предыдущих битов. Такая «память» кодера задаётся параметром длины ограничения. Благодаря дополнительной избыточности, распределённой по времени, свёрточные коды обеспечивают высокую устойчивость к одиночным и пакетным ошибкам, возникающим в каналах с гауссовым шумом, замиранием и интерференцией. На приёмной стороне используется алгоритм Витерби— поиск наиболее вероятного пути по решётке состояний кодера. Каждый такт блок «сложение-сравнение-выбор» обновляет метрики ветвей: при мягком декодировании применяются расстояния евклидовы или LLR, при жёстком — расстояние Хэмминга; сохраняется только путь с минимальной накопленной метрикой, после чего выполняется обратная трассировка для восстановления исходной последовательности бит.

IV. Результат моделирования

Для моделирования в сфере MATLAB было использоваться следующие параметры: свёрточное кодирование типа (2, 1, 3) ; тип модуляции — QPSK, QAM-16, QAM-64, STBC - MIMO 2×2 схема Аламоути, свёрточный код, использующей трёхразрядный сдвиговый регистр и два образующих многочлена: G1=111_2 и G2=101_2 .

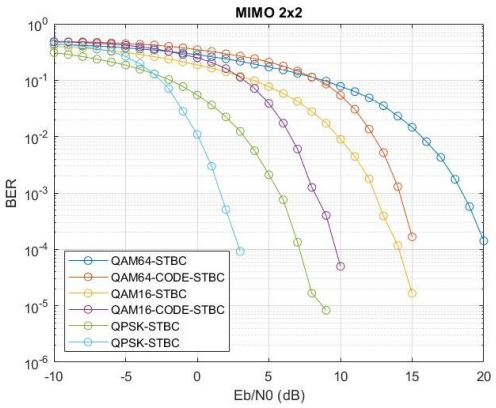


Рис. 2. Сравнение BER при применении свёрточного кодирования
и без применения свёрточного кодирования

Как видно из кривых BER, применение сверточного кода с STBC даёт энергетический выигрыш. При BER≈10^{-3} - 10^{-4} сдвиг кривой составляет порядка 4 – 5 дБ по Eb/№. Таким образом, комбинация и сверточного кодера демонстрирует не только классический кодовый выигрыш, но и повышенную устойчивость к аддитивному белому шуму, что подтверждает целесообразность совмещения пространственно-временных и помехоустойчивых кодов в MIMO-системе.

V. Заключение

В данном исследовании проведён анализ помехоустойчивости MIMO-системы, в которой STBC сочетается со свёрточным кодом и декодированием Витерби. Моделирование в Матлабе показало, что предложенная схема обеспечивает значительное снижение BER по сравнению с отдельным использованием STBC. Полученные результаты подтверждают актуальность комбинированного подхода для систем связи пятого поколения и Wi-Fi 6/7, где одновременно критичны высокая пропускная способность и энергоэффективность.

Литература

[1] *Lu L. et al.* An overview of massive MIMO: Benefits and challenges //*IEEE journal of selected topics in signal processing*. – 2014. – Т. 8. – №. 5. – С. 742-758.

[2] *Cortes-Pena L. M.* MIMO space-time block coding (STBC): simulations and results //*Design Project: Personal and Mobile Communications*, Georgia Tech (Ece6604). – 2009. – С. 1-8.

[3] *Lau C. M. et al.* Performance of MIMO Systems Using Space Time Block Codes (STBC) //*Open Journal of Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11. – №. 03. – С. 273.

[4] *Padgal G. G., Oza S.* An efficient Viterbi algorithm for communication system //*Research Journal of Engineering and Technology*. – 2022. – Т. 13. – №. 1. – С. 10-16.

[5*] Золотарев В. В., Овечкин П. В.* Способ кодирования и декодирования блокового кода с использованием алгоритма Витерби. – 2017.

Двухрезонаторный полосовой фильтр на базе ПЭДВ в КВЧ диапазоне

В. В. Крутских, А. Н. Ушков, А. Ю. Трофимов,
Д. С. Чукашов, А. Э. Мирзоян, А. И. Черников
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Россия
KrutskikhVV@mpei.ru, UshkovAN@mpei.ru, TrofimovAnY@mpei.ru,
ChukashovDS@mpei.ru, MirzoyanAE@mpei.ru

Аннотация. *В настоящее время исследование и разработка миниатюрных функциональных узлов КВЧ диапазона представляет особый интерес так как связана с задачами обработки сигналов в системах радиолокации, радионавигации и связи. При этом на смену классическим волноводным решениям приходят конструкции сочетающие в себе не только металлические, но и диэлектрические направляющие структуры, что позволяет не только минимизировать габариты, но и уменьшить потери. Также важное внимание отводится возможности интеграции волноводного функционального узла в существующие технические решения. В связи с этим возникает задача создания новой элементной базы. В данной работе предложено исследование конструкции многорезонаторного фильтра на базе дисковых диэлектрических резонаторов и полуэкранированного диэлектрического волновода (ПЭДВ). В рамках работы проведен анализ волновых процессов при помощи численного эксперимента, а также даны рекомендации для многорезонаторного полосового фильтра. Физический эксперимент подтвердил адекватность выдвинутых предложений. Полученные результаты исследования могут быть использованы при создании узкополосных фильтров на базе ПЭДВ, которые могут быть использованы в системах спутниковой связи, миниатюрных радиолокаторах и устройствах стабилизации генераторов.*

I. Введение

Развитие узлов систем связи тесно связано с увеличением пропускной способности конструкций, снижением прямых потерь и планарным обликом, что определяется возможностью внедрения новых узлов в существующие устройства. Так повышение надежности и эффективности передачи достигается при помощи использования как диэлектрических, так и металлических направляющих структур. Конструкция ПЭДВ в режиме не излучения обладает не худшими показателями качества и дает возможность расположения функциональных узлов устройства на одной плоскости. Достигается это за счет явления запирания электромагнитного поля между пластинами и распространением волны по диэлектрическому стержню [1]. При этом конструкции при добавлении к регулярному участку ПЭДВ дополнительных направляющих конструкций наблюдаются резонансные явления, а также явления связи, которые могут быть использованы в избирательных узлах, применяемых в качестве антенно-фидерного тракта или стабилизации узла генерации [2].

Необходимо отметить, что в научных работах по проектированию фильтров на ПЭДВ рассматриваются как правило два типа конструкций: первые опираются на волновые процессы, происходящие как правило на участке с резкой нерегулярностью. Вторые базируются на явлениях резонанса и межэлементной связи. При этом как в зарубежной, так и в отечественной литературе предлагаются лишь описания конструкций и рекомендации по их применению. Такое положение событий замедляет развитие и интеграцию перспективных узлов в современные системы и комплексы и требует параметризации конструкций с целью выявления закономерностей и разработки алгоритмов расчета фильтров под требуемые технические задачи.

Таким образом, особый интерес представляет параметрическое описание волноводных конструкций с целью создания цифровых двойников и анализ волновых процессов для оптимизации характеристик узла.

II. Основные результаты

В настоящей работе дано параметрическое описание конструкции двухрезонаторного фильтра на основе дисковых диэлектрических резонаторов в режиме высших азимутальных колебаний, включенных между двумя стержнями ПЭДВ, что показано на рисунке 1. Для оценки и поиска новых свойств и явлений в волноводном тракте были использованы рекомендации работ [3] и [4], связанные с методикой численного и физического экспериментов.

Опираясь на картину электромагнитных полей следует, что несмотря на возбуждение резонансной системы часть энергии протекает по стержню и наблюдается эффект просачивания энергии. Также необходимо отметить узкополосность системы, связанную с высокими значениями собственной добротности дисковых диэлектрических резонаторов в режиме «Шепчущей галереи», создает трудности при выборе величины частотного шага при изучении модели. Это может привести к тому, что часть явлений может быть не отражено в результатах расчетов [5].

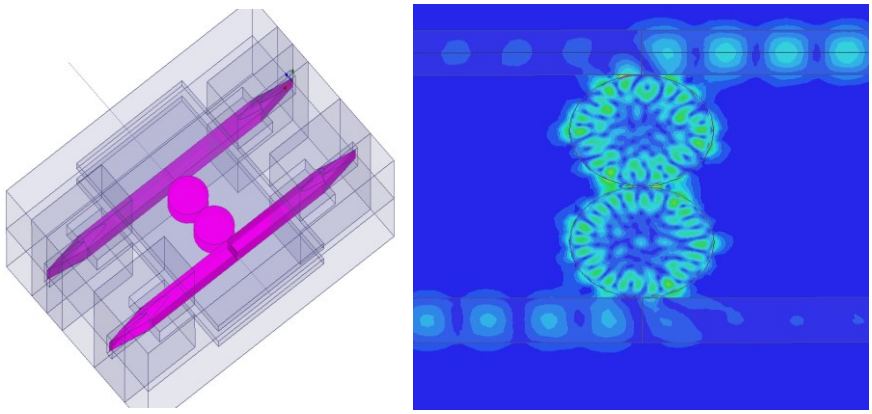


Рис. 1. Конструкция двухрезонаторного полосового фильтра на дисковых диэлектрических резонаторах и ПЭДВ, а также распределение электромагнитного поля в узле на частоте 32 ГГц

В работе предложен параметрический анализ конструкции узкополосного полосового фильтра. Изучение влияния электродинамических характеристик проводилось в диапазоне частот от 28 до 37 ГГц, где были выявлены резонансные частоты колебательной системы. Затем проводились изменение электродинамических характеристик и оценка матрицы рассеяния узла.

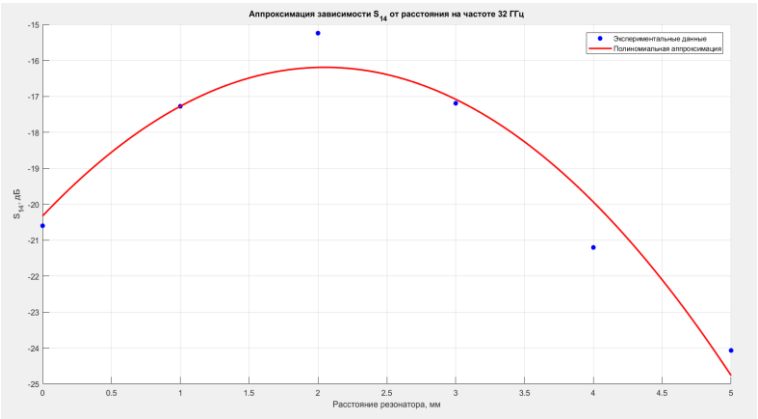


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи от величины разрыва между диэлектрическими стержнями

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента передачи от величины зазора между стержнями и резонаторами. В качестве передаточной характеристики узла был рассмотрен коэффициент S_{41}, который обладал минимальными проходными потерями в сравнении с другими элементами матрицы рассеяния. Из исследования конструкции целесообразно добавить металлические отражатели на концы волноводных стержней, чтобы снизить эффект просачивания электромагнитной волны и перенаправить энергию падающей волны.

III. Заключение

По полученным в исследовании результатам проведен анализ связи между диэлектрическими резонаторами и диэлектрическими стержнями ПЭДВ. Из него можно сделать вывод, что первоначальное увеличение разрыва приводит к улучшению передаточной характеристики, что связано увеличением разрежённости спектра собственных частот дискового диэлектрического резонатора. Однако при дальнейшем отдалении связь ослабевает, и энергия волны экспоненциально затухает. Для улучшения передаточной характеристики в работе предложено использовать металлические отражатели, установленные на расстоянии четверти длины волны от участка с резонатором.

Литература

[1] *Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Vishnevsky V. M.* Modeling and Analysis of Multi-channel Queuing System Transient Behavior for Piecewise-Constant Rates //*International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. – Cham: Springer Nature Switzerland*, 2022. – С. 397-409.

[2] *Крутских В.В., Ушков А.Н., Арикат Х., Завитаев Д.О., Мирзоян А.Э.* Влияние нерегулярностей на металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы.* - 2022. - Т. 25. - №3. - С. 58-66.

[3] *Ushkov A. N. et al.* Industrial VSWR automation module in the EHF range //*2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. – IEEE, 2024. – С. 714-719.

[4] *Krutskikh V. V. et al.* Evaluation of the Study of Dielectric and Metal-Dielectric Waveguides Using Digital Twins Under Modern Conditions //*2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT).* – IEEE, 2023. – С. 1-7.

[5] *S. Bankov, A. Kurushin, and V. Razevig*, Analysis and optimization of three-dimensional microwave structures using HFSS. *Litres*, 2022.

[6] *A. U. Guryanov and V. V. Krutskich*, “Engineering calculation and optimization of the floor parameters of a shielded dielectric waveguide in non-emitting mode,” *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the MEI*, no. 1, pp. 92–97, 2017.

Большие языковые модели с поддержкой рассуждений в задаче анализа безопасности программного кода

В. В. Швыров, Д. А. Капустин, Р. Н. Сентяй
Луганский государственный педагогический университет, г. Луганск, Россия,
kap-kapchik@mail.ru

***Аннотация**. Большие языковые модели с поддержкой рассуждений активно развиваются последние годы. Наиболее ярким представителем таких моделей является семейство моделей DeepSeek-R1, которые были представлены в конце 2024 года. Возможности к рассуждению добавили и другие популярные большие языковые модели, такие как GPT-4, Qwen, QwQ, Gemini и др. Изучению возможностей моделей DeepSeek посвящено уже более 100 публикаций различных авторов. Однако, исследования рассуждающих моделей в сфере анализа безопасности и классификации уязвимостей практически не представлены. Современные модели на архитектуре Transformer уже широко используются в различных сферах программной инженерии, в том числе и в задачах статического анализа программного кода. Одной из задач, возникающих в подобном анализе, является классификация различных типов уязвимостей. В связи с этим, интересно оценить возможности больших языковых моделей с поддержкой рассуждений классифицировать наиболее распространенные типы уязвимостей согласно каталогу CWE. В работе представлены оценки возможностей ряда «рассуждающих» моделей по обнаружению и классификации уязвимостей входящих в рейтинг CWE Top 25, который содержит описания наиболее распространенных уязвимостей 2024 года.*

I. Введение

Большие языковые модели широко применяются в различных задачах статического анализа, который подразумевает анализ кода без его выполнения. Исследования в данном направлении представлены в работах [1-5]. Большинство из больших языковых моделей основаны на архитектуре Transformer [6]. Существенным этапом в развитии таких моделей стало появление моделей с поддержкой возможностей рассуждения, которая подразумевает возможность моделей общего назначения строить логическую цепочку рассуждений CoT (Chain of Things) для получения ответа на достаточно сложные вопросы.

В данной работе изучены возможности ряда моделей DeepSeek-R1 [7], Qwen, Devstral для классификации и «понимания» уязвимостей из рейтинга CWE Top 25 [8]. Для оценки возможностей моделей сформирован комплекс оценочных вопросов нескольких видов.

Необходимо отметить, что модели DeepSeek-R1 представлены моделями, которые существенно различаются числом параметров, размером, типом квантованием, моделью используемой в процессе дистилляции. Так, размер наиболее продвинутых моделей DeepSeek-R1 превышает 1.4 Тб, число параметров достигает 671 млрд. Для использования локально моделей такого размера требуются значительные вычислительные ресурсы. В связи с этим, интересно оценить возможности меньших по размеру моделей с различными параметрами, в том числе, полученные путем дистилляции из больших моделей, для решения задач в области безопасности.

Актуальность тематики работы обусловлена растущей популярностью больших языковых моделей с возможностями рассуждения, развитием всей сферы искусственного интеллекта, а также необходимостью разработки новых эффективных средств автоматизированного анализа безопасности и классификации уязвимостей в программном коде. Кроме того, появление и стремительное развитие интеллектуальных агентов, которые имеют в качестве основного управляющего центра большие языковые модели, делают выбор моделей крайне важным для повышения эффективности подобных агентов, при решении различных прикладных задач.

II. Анализ больших языковых моделей с поддержкой рассуждений

На ресурсе HuggingFace [9] представлено уже более 1 770 000 различных нейросетевых моделей, модели семейства DeepSeek-R1 занимают лидирующие позиции. В целом, различных моделей DeepSeek представлено более 70 позиций. Одной из наиболее свежих моделей является модель DeepSeek-R1-0528.

Такое большое количество моделей обусловлено использованием различных методов квантования, тонкой настройкой уже представленных моделей, а также использованием различных моделей в процессе дистилляции модели.

Число тренируемых параметров в больших языковых моделях стремительно растет, в связи с этим, для хранения и использования уже обученной модели требуется значительное число памяти. Одним из путей решения задачи снижения требуемого объема памяти стало снижение числа бит, которые отводятся под хранение каждого из параметров. Процесс сжатия модели путем снижения числа бит называется квантованием. Широко распространенными типами квантования являются BF16, Q4_K_M, Q5_K_S и др.

Для оценки качества генерации до и после квантования используется метрика перплексии, которая представляет собой экспоненту от средней логарифмической вероятности правильного предсказания. Чем ниже показатели перплексии, тем лучше модель. Для последовательности из N токенов $w_1, w_2, ..., w_N$ и языковой модели, которая предсказывает вероятности $P(w_t \mid w_1, w_2, ..., w_{t-1})$ перплексия вычисляется по формуле

$$Perplexity = exp\left(-\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} log\, P\,(w_t|w_1, \dots, w_{t-1})\right)$$

Однако, данная метрика не всегда хороша для оценки эффективности в случае сложных высокоуровневых задач таких как анализ безопасности, решение математических задач, в частности, задач статического анализа.

Еще одним подходом для снижения размера моделей является дистилляция. Дистилляция подразумевает процедуру передачи обобщающих способностей модели-учителя модели-ученику путём минимизации расхождения между их выходными предсказаниями, включая вероятностные распределения, выходы промежуточных слоёв или представления признаков.

В таблице 1 представлены характеристики некоторых распространенных моделей,

Таблица 1. Характеристики моделей

Название модели	Архитектура модели	Число параметров, млрд	Метод квантования	Размер контекста	Размер модели, Гб
DeepSeek-R1:7b	Qwen2	7,6	Q4_K_M	131 072	4,7
DeepSeek-R1:8b	llama	8	Q4_K_M	131 072	4,9
DeepSeek-R1:14b	Qwen2	14,8	Q4_K_M	131 072	9
DeepSeek-R1:32b	Qwen2	32,8	Q4_K_M	131 072	19
DeepSeek-R1:70b	llama	70,6	Q4_K_M	131 072	40
DeepSeek-R1:671b	MoE	671	Q4_K_M	163 840	404
QwQ	Qwen2	32,8	Q4_K_M	131 072	20
Gemma 3	Gemma3	27,4	Q4_K_M	8 192	17
Devstral:24b	llama	23,6	Q4_K_M	131 072	14
Qwen2.5-coder:32b	Qwen2	32,8	Q4_K_M	131 072	20
DeepSeek-R1-0528	MoE	671	Q4_K_M	131 072	404

Для оценки возможностей моделей были сконструированы 10 запросов вида:

Based on the code analysis, form a dictionary z={"CWE-79":"", "CWE-125":"", "CWE-94":"", "CWE-502":"", "CWE-476":"", "CWE-787":"", "CWE-78":"", "CWE-20":"", "CWE-200":"", "CWE-798":"", "CWE-89":"", "CWE-416":"", "CWE-77":"", "CWE-863":"", "CWE-190":"", "CWE-352":"", "CWE-862":"", "CWE-287":"", "CWE-918":"", "CWE-400":"", "CWE-22":"", "CWE-434":"", "CWE-

269":"", "CWE-119":"", "CWE-306":"", "clearCode":""} where the values can only be 0 or 1. Where value of 1, which corresponds to the vulnerability type found in the code. If the code contains no vulnerabilities, then the 'clearCode' key should have the value 1. Here is the code to analyze: CODE

Блок CODE содержит фрагмент программного кода, который содержит только одну уязвимость конкретного типа CWE из первых десяти типов уязвимостей, входящими в рейтинг CWE Top 25. Фрагмент программного кода был взят из справочных данных каталога CWE, который включает описание уязвимостей и примеры программного кода, содержащего данные типы уязвимостей. Таким образом, на выходе должен быть сформирован словарь содержащий в качестве значений 0 или 1, где значение 0 ключа «CWE-XXX» соответствует отсутствию уязвимости типа CWE-XXX в анализируемом фрагменте программного кода. Значение 1, соответствует наличию уязвимости. Если фрагмент кода не содержит ни одной уязвимости, то должно быть установлено значение 1 в ключ «clearCode».

Структура словаря и подобный формат запроса необходим для унификации ответов, которые формирует модель. Кроме того, на основании полученных данных возможно сформировать бинарный вектор, который может быть использован для дальнейшей оценки точности ответа модели. В задачах многоклассовой классификации, для случая, когда входные данные представлены бинарными векторами для оценки точности удобно использовать метрику потерь на основании расстояния Хемминга [10]. Метрика потерь по Хеммингу показывает долю неверных ответов от общего числа ответов.

Рассмотрим пример адаптации данной метрики. Обозначим через $w=(w_1,...,w_n)$ вектор, содержащий истинные значения. Через $p=(p_1,...,p_n)$ обозначим вектор, составленный из предсказаний модели для некоторого анализируемого типа CWE. Тогда метрика потерь Хемминга (Hamming loss) - HL вычисляется как

$$HL = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f\{w_i \neq p_i\},$$

где *f=1*, если условие $w_i \neq p_i$ является истинным, и принимает значение 0 в случае, если условие ложно. Для случая *L* классов метрика принимает вид

$$HL = \frac{1}{nL}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{L} f\{w_{ij} \neq p_{ij}\},$$

где w_{ij}, p_{ij} - *i*-е значение для *j*-го класса истинного вектора и вектора предсказаний соответственно.

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что модели DeepSeek-R1:7b, DeepSeek-R1:8b, DeepSeek-R1:14b не смогли сформировать ответы на запрос в требуемом виде. В некоторых случаях и модели DeepSeek-R1:32b и DeepSeek-R1:70b при абсолютной уверенности в одном варианте также не выдавали ответ в формате требуемого словаря json, а в произвольной форме, которая требовала доработки для формирования словаря. Таким образом, для дальнейшего анализа были выбраны модели DeepSeek-R1-0528, Qwen2.5-coder:24b, DeepSeek-R1:32b и Devstral:24b. Последняя из моделей не поддерживает режим рассуждения, однако является наиболее продвинутой из моделей для генерации и анализа программного кода.

В таблице 2 представлены результаты оценки эффективности нескольких моделей с использованием метрики HL.

Таблица 2. Показатели эффективности с использованием метрики потерь по Хеммингу HL

Тип уязвимости	Значение HL для DeepSeek-R1-0528	Значение HL для Qwen2.5-coder	Значение HL для DeepSeek-R1:32b	Значение HL для Devstral:24b
CWE-79	0	0	0	0
CWE-787	0,0385	0,0769	0,1154	0,1538
CWE-89	0,0769	0,0385	0,0385	0,0769
CWE-352	0,0385	0,2692	0,1538	0,1923
CWE-22	0,0769	0,0385	0,0385	0,0769
CWE-125	0,1538	0,1154	0,0385	0,0769
CWE-78	0,0769	0,0385	0,2692	0,2692
CWE-416	0	0	0,0385	0,0769
CWE-862	0,0769	0,0769	0,3846	0,1154
CWE-434	0,2308	0,1154	0,1154	0,3846
Значение HL по всем типам	0,076	0,076	0,119	0,142

III. Заключение

Проведенные анализ показал, что большие языковые модели с поддержкой рассуждений могут быть использованы для поиска некоторых типов уязвимостей. Например, в тестовом фрагменте программного кода уязвимость типа CWE-79, связанную с неправильной нейтрализацией входных данных при генерации веб-страницы обнаружили все модели. В то же время, выбор конкретной модели, которая будет показывать наилучшие результаты для всех типов уязвимостей остается открытой задачей.

Модель общего назначения с поддержкой рассуждений DeepSeek-R1-0528, которая была выпущена в конце мая 2025 года показала результат сопоставимый с моделью, специально обученной для генерации и анализа программного кода Qwen2.5-coder. Результаты показывают превосходство моделей с поддержкой рассуждений над «классической» генеративной моделью Devstral. Это свидетельствует о значительном прогрессе в развитии архитектуры рассуждающих моделей. К недостаткам больших языковых моделей можно отнести высокую степень случайности ответов, а также все еще недостаточную точность ответов при решении специализированных задач в области безопасности.

Литература

[1] *X. Hou, Y. Zhao, Y. Liu, et al.* “Large Language Models for Software Engineering: A Systematic Literature Review”. ArXiv, abs/2308.10620., 2023. DOI:10.48550/arXiv.2308.10620.

[2] *J. Hu, Y. Shen, P. Wallis. et al.* “Lora: Low-rank adaptation of large language models”, *ArXiv*, abs/2106.09685, 2021.

[3] *A. Fan, B. Gokkaya, M. Harman et al.,* “Large language models for software engineering: Survey and open problems”, ArXiv, abs/2310.03533. – 2023. DOI:10.1109/ICSE-FoSE59343.2023.00008.

[4] *A. Shalaginov, S. Banin, A. Dehghantanha, K. Franke,* “Machine Learning Aided Static Malware Analysis: A Survey and Tutorial”, ArXiv, abs/1808.01201. – 2018. DOI:10.1007/978-3-319-73951-9_2.

[5]. *В. В. Швыров, Д. А. Капустин, Р. Н. Сентяй, Т. И. Шулика,* “Использование больших языковых моделей для классификации некоторых уязвимостей в программном коде”, Программная инженерия. – 2024. – Т. 15, № 9. – С. 465-475. – DOI 10.17587/prin.15.465-475. – EDN YHMFKD.

[6] *A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, et al.* “Attention is all you need”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 5998–6008.

[7]. *D. Guo et al.* “DeepSeek-R1: Incentivizing Reasoning Capability in LLMs via Reinforcement Learning”, ArXiv abs/2501.12948 (2025): n. pag.

[8]. 2024 CWE Top 25 Most Dangerous Software Weaknesses, URL: *https://cwe.mitre.org/top25/archive/2024/2024_cwe_top25.html* (дата обращения: 11.06.2025).

[9]. Hugging Face. Models. URL: *https://huggingface.co/models* (дата обращения: 11.06.2025).

[10]. *S. Destercke*, “Multilabel Prediction with Probability Sets: The Hamming Loss Case”, *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. IPMU 2014*. Communications in Computer and Information Science, vol 443. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-08855-6_50.

Применение сгенерированных искусственным интеллектом изображений: перспективы и проблемы

***О. В. Блинова*[1], *И. К. Никитин*[2]**
[1]*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,*
[2]*ООО Яндекс.Технологии, г. Москва. Россия,*
blinova_olga_v@mail.ru, w-495@yandex.ru

***Аннотация**. Системы генерации изображений доступны широкому кругу пользователей. Они активно применяются в рекламе, подготовке презентаций, для контента в соцсетях и т.д. Главное преимущество сгенерированных изображений – это уникальное изображение, полученное именно под запрос пользователя и чаще всего свободное от ограничений в авторских правах. Хотя на самом деле все не так просто и прозрачно и с авторскими правами, и с законодательными нормами. Уже есть прецеденты судебных процессов на основе изображений, сгенерированных с помощью нейросети. И скорее всего, их в ближайшем будущем станет кратно больше. С другой стороны, это мощнейший инструмент, и если пару лет назад сгенерированные фотографии было несложно отличить от живых, то сейчас качество генераций действительно впечатляет. Возможности применения сгенерированных изображений намного шире, чем сейчас представляется.*

I. Введение

Развитие нейронных сетей и технологий искусственного интеллекта стало практически революцией в области IT технологий и перевернет жизнь человека самым кардинальным образом. Уже сейчас на рынке появляются блюда по рецептам от ИИ, ароматы и цвета, предлагаемые ИИ и т.д. Это огромная лавина возможностей, позволяющая сократить время, затраты и силы на получение качественных изображений и одновременно с этим максимально их персонализировать, подстраиваясь под нужды и потребности каждого пользователя. Но важно помнить, что нейросети предлагают решения не совсем уникальные, а являющиеся результатом компиляции огромного числа уже существующих источников. Вопрос, где проходит грань между плагиатом и творчеством был неоднозначен всегда, а с развитием генераций стал гораздо более остро. Нейросети легко могут имитировать стиль конкретного художника, создавая по сути подделки под его работы или создавать фейковые сцены с участием реальных людей, чьи фото можно найти в интернете [1]. И не всегда пользователь сможет отличить реальное изображение от фейка, а часто даже не будет пытаться разобраться.

II. Перспективы применения

Использование сгенерированных изображений в рекламе уже стало нормой, но все больше таких изображений появляется в качестве принтов на одежде и текстиле, создания различных вариантов товара для заказа и т.д.[2]. Безусловно, применение в сфере торговли и промышленности будет наращивать обороты – возможность моментальной печати персонифицированной одежды или игрушек, текстиля, сувениров с помощью технологий сублимационного переноса или 3д печати. Создание предметов искусства, в том числе с использованием образа человека, персонажа или животного. Индивидуальные книжки с неповторимыми иллюстрациями, проекты дизайнов интерьера. Персонифицированные учебные материалы и визуализация данных, развлекательный контент, кино, игровые вселенные и т.д. Возможности быстрой, дешевой, качественной и практически неограниченной персонализации всего, с чем встречается человек. Это даст еще более фантастические возможности для раскрытия талантов человека, проявления его индивидуальности, обеспечения комфортных условий жизни [3].

III. Существующие проблемы

А теперь стоит представить, что человек получил несколько ваших фотографий, или даже не получил, а сгенерировал по описанию максимально реалистично, и может создавать игрушки с вашим лицом, материалы непристойного содержания, любые предметы быта и интерьера. И он может даже успешно обходить любые жалобы и претензии. Например, можно добавить на персонажа несуществующую родинку или изменить цвет глаз и все, сложно будет доказать, что тиражируемый образ ваш. Или вашего персонажа, стиля творчества, домашнего животного. Сейчас это непроработанная зона в законодательстве и вопросы обеспечения неприкосновенности личной жизни и проверки реальности фактов встают очень остро [4].

В профессиональном использовании очень сложно получить ожидаемый результат генерации [5]. Нейросети очень плохо понимают обобщения и абстракции, например, очень тяжело получить эскиз, намек на какой-то образ, стилизацию. Крайне сложно объединить несколько разных генераций в одной сцене, даже если для каждой в отдельности подобран качественный промпт. Нейросети с трудом справляются с изображениями стилизованного текста – теряются детали и буквы. Бывает сложно уйти от шаблонной стилистики и получить действительно неповторимое изображение. Вероятнее всего при попытке сгенерировать какой-то определенный образ на очередной попытке генерации пользователь согласится на предложенный вариант, так и не достигнув желаемого. Вероятно художник по нейрогенерациям скоро будет востребованной профессией.

IV. Заключение

Перед человечеством открылся новый фантастический мир сгенерированного контента. Который может стать как чудесным, сказочным, исполняющим желания пользователя, так и ужасающим, страшным и непобедимым монстром. Станет он даром или проклятием решается прямо сейчас специалистами в сферах информационных технологий, прав и закона, этики и других сфер, сталкивающихся в своей работе с искусственным интеллектом. Важно уделять пристальное внимание безопасности, законности и этичности получаемых результатов, создавая системы и способы обеспечения этих норм.

Литература

[1] *О.В. Блинова, Ю.В. Таратухина* “Вопросы соблюдения законодательных и культурно-этических норм системами искусственного интеллекта” // VI Всероссийская конференция «Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование». Омск, 2024. С.296–300.

[2] *В. А. Груммет, С. М. Бутов* “Искусственный интеллект в области генерации изображений и видео: основные тенденции и перспективы развития” //*Междисциплинарные подходы в современной науке: вызовы, достижения и перспективы: сб. ст. междун. науч.-практ. конф.(25.02. 2024 г., г. Воронеж)*.Уфа: Аэтерна. 2024. С. 26-28.

[3] *А. О. Лысенко* “Применение технологий искусственного интеллекта в художественной сфере деятельности” //*Научный аспект*. 2023.Т. 25. №. 12. С. 3064-3070.

[4] *Д. В. Неренц* “Юридические и этические проблемы регулирования применения искусственного интеллекта в современных массмедиа” //*Вестник РГГУ. Серия: Литературоведение. Языкознание. Культурология*. 2024. №. 11. С. 122-137.

[5] *П. В. Гаранина, В. В. Драган* “Перспективы генерации контента в областях с низким уровнем медийности с применением нейросетей” //*Вопросы медиабизнеса*. 2024. Т. 3. №. 3. С. 39-51.

Исследование характеристик узла дискового диэлектрического резонатора и ПЭДВ в КВЧ диапазоне

В. В. Крутских, А. Н. Ушков, А. Ю. Трофимов,
Д. С. Чукашов, А. Э. Мирзоян, А. И. Черников
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Россия,
KrutskikhVV@mpei.ru, UshkovAN@mpei.ru, TrofimovAnY@mpei.ru,
ChukashovDS@mpei.ru, MirzoyanAE@mpei.ru, ChernikovAI@mpei.ru

Аннотация. *Разработка современных систем связи опирается на поиск новых технологий и конструкций устройств техники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. При этом особое внимание отводится узлам на основе металлических и диэлектрических направляющих структур. Это объясняется возможностью снижения погонных потерь за счет использования диэлектрических материалов с малым тангенсом диэлектрических потерь, а также снижения радиационных потерь при помощи установки металлических экранов. В связи с этим перспективной конструкцией выступает полуэкранированный диэлектрический волновод (ПЭДВ) и создание новой элементной базы на нем. При этом особое внимание необходимо уделить явлениям и волновым процессам на базе которых осуществляется создание нового функционального узла. В данной работе предложено исследование влияния связи дискового диэлектрического резонатора в режиме высоких азимутальных колебаний и стержня (ПЭДВ). В рамках работы получена оценка характеристик узла с диэлектрическим элементом с различными габаритами и диэлектрической проницаемостью. При помощи пакетов симуляции волновых процессов получены представления о картинах распределения полей в структуре, а физический эксперимент на базе панорамного измерителя позволил подтвердить адекватность выводов, полученных в ходе численного эксперимента. Полученные в ходе работы результаты показали не худшие габариты и электродинамические характеристики узла в диапазоне 25-37 ГГц. Полученные результаты исследования могут быть использованы при построении фильтров на базе ПЭДВ, а также применены в узлах стабилизации устройств генерации сигналов.*

I. Введение

Использование различных диэлектрических направляющих структур в технике миллиметрового диапазона находит все большее применение в различных функциональных узлах, что связано с развитием планарных конструкций волноводных узлов. Так ключевыми характеристиками выступают возможности минимизации габаритов узлов, повышение их эффективности и электромагнитной совместимости, что также связано с технологичностью устройства [1]. Проектирование на базе ПЭДВ в режиме не излучения является перспективным направлением так как в последние годы возрос интерес мирового сообщества к этим конструкциям. Объясняется это необходимостью создания новой элементной базы для систем связи шестого поколения на диапазон 25-100 ГГц. При этом внимания заслуживает взаимодействие диэлектрического стержня с различными нерегулярностями и объектами, как правило диэлектрической или металлической природы [2].

Необходимо отметить, что в научных работах по проектированию различных устройств на ПЭДВ предлагаются описания конструкций без численного или параметрического описания, что затрудняет инженерный расчет и может привести к ошибке. Этот фактор создает потребность в поиске не худших габаритных характеристик узлов, описания наблюдаемых волноводных процессов и математических описаний закономерностей экспериментальных узлов.

Таким образом, сегодня особый интерес представляет анализ волновых процессов, протекающих в ПЭДВ, взаимодействующим с диэлектрическими направляющими структурами, а также с резонаторами разной формы.

II. Основные результаты

В настоящей работе производится исследование влияния уровня связи, габаритных и электродинамических параметров узла ПЭДВ и диэлектрического резонатора «Шепчущей галереи». Для оценки волновых процессов в работе используется комплексный метод исследования, который включает в себя численный и физический эксперимент и рекомендации работ [3] и [4]. Указанный подход позволяет провести анализ волновых процессов в миллиметровом диапазоне с высокой точностью. Ключевым фактором для исследуемой конструкции является то, что измерение распределения полей требует внесения нерегулярности в виде зонда, что дает значительный вклад и деформирует картину поля, а также резко снижает значение нагруженной добротности резонатора [5].

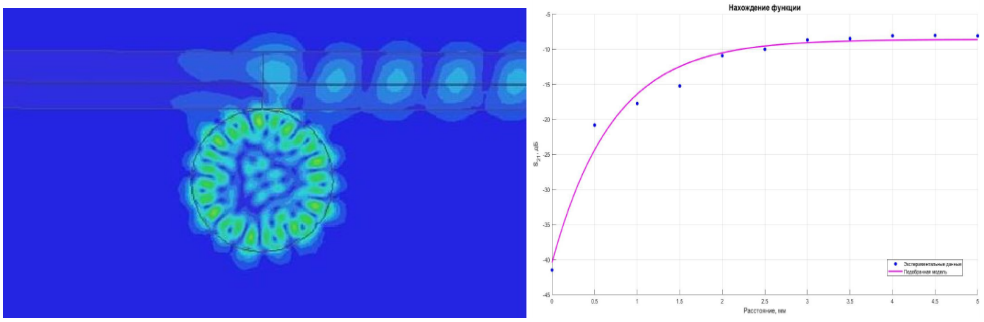


Рис. 1. Распределение электромагнитного поля в ПЭДВ с диэлектрическим резонатором в режиме высоких азимутальных колебаний и зависимость влияния связи стержня ПЭДВ и резонатора на передаточную характеристику узла

В работе предложен анализ конструкции диэлектрического резонатора и ПЭДВ, которые при параллельном включении образуют узкополосный режекторный фильтр. Изучение и поиск не худших электродинамических характеристик проводился в диапазоне частот от 28 до 37 ГГц. При этом диэлектрическая проницаемость дисковых резонаторов варьировалась от 2,25 до 12.

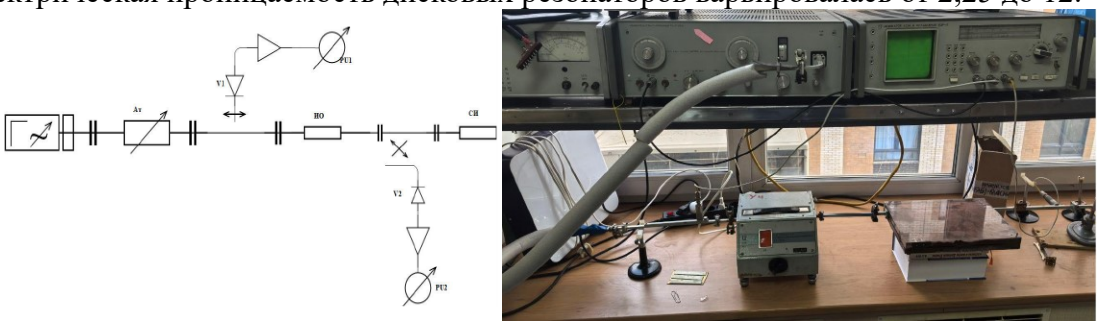


Рис. 2. Структурная схема измерения матрицы рассеяния экспериментального узла и измерительная установка на базе панорамного измерителя Р2-65

На рисунке 2 показана структурная схема установки физического эксперимента. Исследование проводилось на основе измерения матрицы рассеяния узла и так как узел является симметричным относительно центра узла то, справедливо следующее утверждение: $S_{12} = S_{21}$ и $S_{11} = S_{22}$.Указанная зависимость также отражена в работе [6].

Из исследования влияния межэлементной распределенной связи были получены схожие закономерности для различных электродинамических параметров дисков. Также в режиме не излучения при соблюдении плоскостной симметрии практически отсутствуют радиационные потери, что позволяет варьировать высоту диэлектрического диска. Для различных проницаемостей были получены не худшие размеры резонаторов.

III. Заключение

По полученным в исследовании данным можно сделать вывод о не худших габаритах и электродинамических параметрах режекторного фильтра на ПЭДВ с диэлектрическим резонатором в режиме высоких азимутальных колебаний. Из результатов работы следует, что отдаление резонатора от стержня приводит к разрежённости частотного спектра. Аналогичный эффект наблюдается при уменьшении диэлектрической проницаемости, однако при этом падает добротность колебательной системы и ухудшается передаточная характеристика узла. Изученный узел может быть использован для задач фильтрации и частотного разделения сигналов, а также для метрологических задач измерения диэлектрической проницаемости материала.

Литература

[1] *Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Vishnevsky V. M.* Modeling and Analysis of Multi-channel Queuing System Transient Behavior for Piecewise-Constant Rates //*International Conference on Distributed Computer and Communication Networks*. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – С. 397-409.

[2] *Крутских В.В., Ушков А.Н., Арикат Х., Завитаев Д.О., Мирзоян А.Э.* Влияние нерегулярностей на металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. - 2022. - Т. 25. - №3. - С. 58-66.

[3] *Ushkov A. N. et al.* Industrial VSWR automation module in the EHF range //*2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. – IEEE, 2024. – С. 714-719.

[4] *Krutskikh V. V. et al.* Evaluation of the Study of Dielectric and Metal-Dielectric Waveguides Using Digital Twins Under Modern Conditions //*2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. – IEEE, 2023. – С. 1-7.

[5] *S. Bankov, A. Kurushin, and V. Razevig*, Analysis and optimization of three-dimensional microwave structures using HFSS. *Litres,* 2022.

[6] *A. U. Guryanov and V. V. Krutskich*, “Engineering calculation and optimization of the floor parameters of a shielded dielectric waveguide in non-emitting mode,” *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the MEI*, no. 1, pp. 92–97, 2017.

Security testing of information systems using artificial intelligence

V. V. Vaskevich, M. A. Vinokurov, T. A. Melnikova, D. A. Shumilo
Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus,

Abstract*. This paper provides an overview of the main functions of popular generative artificial intelligence chatbots: ChatGPT, Grok, DeepSeek, Gemini, and Copilot. It presents the results of using artificial intelligence as an assistant for system vulnerability testing and the analysis of information security logs. The main advantages and disadvantages of using AI chatbots in the field of cybersecurity are described.*

I. Introduction

In the digital era, cybersecurity has become particularly crucial. Artificial intelligence (hereinafter referred to as AI) and its rapid development are introducing significant changes to the methods of penetration testing and vulnerability analysis of modern systems. These systems are constantly growing in complexity, which requires more comprehensive approaches to ensuring their security.

This paper reviews popular generative artificial intelligence chatbots and describes scenarios for their use as a tool to assist specialists in penetration testing and log analysis in modern security systems.

II. Overview of popular generative AI chatbots

From an accessibility standpoint, generative AI chatbots are optimal solutions for assisting novice specialists [1-2].

One of the very first chatbots was ChatGPT from OpenAI, with its first version released in 2022. Without registration, the bot offers an introductory set of features and a limited number of queries. It processes only text and program code, providing answers based on its internal knowledge base or web searches. Upon registration, the bot provides a voice assistant feature that simulates emotions, as well as a query history and the ability to return to previous conversations. Its capabilities expand to reading uploaded files, images, and audio. With a paid subscription, ChatGPT offers the same functions but improved and without limits. Currently, OpenAI blocks access to its services for users from Russia, Belarus, China, Afghanistan, North Korea, and many other countries.

Grok is a chatbot developed by xAI in 2023. Without registration, Grok provides users with answers based on its knowledge base, web searches, and posts on the social network X. The number of queries is limited to four. For registered users, Grok expands its functionality, offering access to "DeepSearch" and "Think Mode," where the model broadens its search and outlines its reasoning. The number of possible queries increases, but images and files are still accepted in limited quantities. It maintains a chat history. A paid subscription, SuperGrok, removes query limits and provides enhanced functionality. Unlike ChatGPT, despite being unavailable in some countries, Grok is open for registration to everyone.

DeepSeek is a chatbot developed by the eponymous Chinese startup in 2023. It is completely free and available for CIS countries, though registration is required for use. Due to its budget-friendly nature, its functionality is quite limited. The "DeepThink" function demonstrates the bot's reasoning, while "Search" is responsible for searching and analyzing information strictly within uploaded files (PDF, DOCX, XLSX, PPTX, and TXT) or text. The chat lacks the ability to browse internet resources in real-time, and its knowledge base is limited to information up to July 2024.

Gemini is a chatbot from Google. The first version was released under the name Bard in February 2023, and a year later, Gemini 1.5 appeared. Unregistered users have a wide range of interaction possibilities with this chatbot [3]. The "DeepResearch" function allows Gemini to conduct a more in-depth information search. Additionally, Gemini offers a range of integrations with Google services. The free version has query limits, while paid subscriptions increase this number in proportion to the subscription cost. Gemini is unavailable in some regions, including Belarus and Russia.

Copilot is a chatbot from Microsoft, developed in 2023. It is a multilingual model. Without registration, the bot can hold a conversation, analyze and generate images, and provides access to the "Think Deeper" function. Upon registration, Copilot saves chat history. A much broader range of possibilities opens up with a Copilot Pro subscription: the chat can be used within Microsoft applications and provides better-generated responses. The free version of the model is available in CIS countries; however, purchasing a subscription is not possible due to restrictions from Microsoft.

Despite the fact that most of the listed chatbots are unavailable in Belarus and Russia, many users access them using bypass mechanisms.

III. Using AI in penetration testing

Penetration testing remains one of the key methods for assessing security posture.

The initial stage of any security audit involves gathering as much information as possible about the target object. Gemini (version 2.5 pro from Google AI Studio) was employed to process large volumes of open-source intelligence (OSINT) and assisted in the automated search and structuring of information about domain names, associated IP addresses, and other data based on Nmap scan results. The advantage of using Gemini at this stage was its ability to quickly process and aggregate information from multiple sources, as well as highlight potentially interesting facts that might be overlooked during a manual search. For example, Gemini was used to generate specific search queries to detect vulnerable configurations.

After the initial information gathering, the next step was scanning for known vulnerabilities. Here, Gemini was applied to analyze the results obtained from standard scanners. It helped interpret their reports, explain the nature of the identified vulnerabilities, and provided information on possible exploitation methods based on its knowledge base. Gemini was also used to correlate information about the software versions used in the system with public vulnerability databases (CVE). This allowed for a faster identification of critical points requiring special attention and helped generate examples of potentially vulnerable configuration files and code snippets for subsequent manual verification.

It is important to note that Gemini was not used for the direct automated exploitation of vulnerabilities, as this requires deep integration into the toolchain and cannot be accomplished without significant resource investment. However, the model assisted in the theoretical development of attack vectors. For instance, based on a description of a specific vulnerability and system configuration, Gemini proposed possible sequences of actions for its verification.

In the final stage, during the preparation of the test report, Gemini was used to structure information and draft preliminary sections. It helped summarize the found vulnerabilities, suggested recommendations for their remediation, and presented technical information in a more comprehensible format. This did not replace expert judgment and final editing but significantly accelerated the documentation preparation process.

IV. Using AI in log analysis

One of the most labor-intensive tasks for a modern cybersecurity analyst is the analysis of logs and artifacts left by malware. System journals, network traffic, registry changes – all of this constitutes a massive amount of data, the manual interpretation of which requires considerable time and expertise. However, generative artificial intelligence, as exemplified by the use of ChatGPT-4, opens new possibilities for automating this process, acting as a powerful assistant. This is most evident when working with logs generated in isolated environments, such as the ANY.RUN sandbox. After analyzing a suspicious file, the system provides a detailed report of its actions. Instead of manually correlating events, ChatGPT-4 was used to obtain a ready-made summary. When analyzing an executable file, ChatGPT-4 instantly highlighted key suspicious activities recorded in the logs: execution from a user's temporary folder, file creation, and establishing connections to non-standard network ports. Based on this disparate data, a conclusion was formed regarding the type of threat corresponding to the events in the logs.

The understanding of malicious activity thus obtained flows smoothly into the next task: creating mechanisms for future threat detection. Here, the very same artifacts identified in the logs become the basis

for generating detection rules. Based on network traffic logs, ChatGPT-4 can assist a specialist in formulating rules for the Suricata system. The rules proposed by ChatGPT-4 are not always perfect and require minor adjustments by a specialist–for instance, specifying string encoding or correcting logic. Nevertheless, they serve as an excellent starting point, significantly speeding up the process [4].

V. Conclusion

The experience of using AI in penetration testing and security log analysis has demonstrated its potential as an auxiliary tool. It can not only accelerate the collection and analysis of information but also aid in understanding vulnerabilities and preparing the groundwork for reporting. In some cases, AI can assist in writing or adapting simple scripts to automate routine checks, such as brute-forcing standard credentials on available services or checking the availability of specific ports and services. This allows a specialist to save time on routine tasks and focus on more complex aspects.

Nevertheless, it is crucial to understand that AI lacks the intuition and real-world experience of a security specialist. It operates on the data it was trained on and cannot always adequately assess the specific context of a particular system. The critical thinking and expert judgment of a specialist remain indispensable at all stages of testing.

Thus, AI does not replace the analyst but rather acts as an effective tool that takes on the routine work of interpreting logs and creating signatures, allowing the human to focus on more complex aspects of the investigation and respond to threats more quickly.

The use of AI should be viewed as a means of enhancing human efficiency, not as a complete replacement. The further development of such tools will make them even more valuable in the arsenal of cybersecurity specialists.

References

[1] *A. Saggu, L. Ante* “The influence of ChatGPT on artificial intelligence related crypto assets: Evidence from a synthetic control analysis Author links open overlay panel”, Finance Research Letters Vol.55(B), 2023,

103993 (https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103993)

[2] *Т.А. Безуглый, М.Е. Ершова,* “Использование текстовых нейросетей и искусственного интеллекта в учебных работах студентов”, Проблемы современного образования, 2023. pp. 206–216.

[3] С. Башкиров “Gemini 2.5 Pro: что умеет самая мощная ИИ-модель от Google” [Electronic resource] Access mode: https://trends.rbc.ru/trends/industry/67ea6cc99a794758d63b84e8.

[4] *ANY.RUN* “How to Use ChatGPT for Malware Analysis” [Electronic resource] Access mode: https://hackernoon.com/how-to-use-chatgpt-for-malware-analysis.

Некоторые тенденции разработок и применения беспилотных авиационных систем: элементы анализа и зарубежные мнения

А. В. Рожнов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
rozhnov@ipu.ru

***Аннотация**. Развитие беспилотных систем на основе технологий искусственного интеллекта имеет направленность на сокращение прямого участия человека и повышение целевой эффективности применения таковых. Несмотря на то, что решение совокупности задач реализации полностью автономного функционирования и применения пока что ещё является востребованной и значимой целью, значительный прогресс на сегодняшний день достигнут преимущественно в частичной автономии, и в преобладающей степени – именно для воздушных систем. Но, в то же время, человеческий надзор остается критически важным и ключевым моментом при принятии решений о взаимодействии. В докладе предлагаются к обсуждению некоторые положения о текущих тенденциях в разработках и применении подобных объектов управления в современных сложных условиях, в основном, – по факту, – применительно к ситуации прошедшего года. Краткий обзор основан исключительно на авторитетных зарубежных мнениях о комплексной проблематике автономии как есть. Ряд моментов при этом находит своё отражение на отдельных мероприятиях Общемосковского научного семинара «Проблемы управления автономными робототехническими комплексами» (ИПУ РАН, Москва) [www.ipu.ru/robot], – как в диверсифицированных приложениях для народного хозяйства настоящего времени, так и, с учётом соответствующих ограничений, в различного рода новых решениях на обозримую перспективу.*

I. Введение

Развитие современных беспилотных систем на основе *технологий искусственного интеллекта* имеет направленность на сокращение прямого участия человека и повышение целевой эффективности их применения. Несмотря на то, что решение совокупности сложных задач реализации автономного функционирования в полном объёме и применения всё ещё остаётся востребованной и значимой целью зарубежных *междисциплинарных исследований*, значительный прогресс сегодня достигнут преимущественно в частичной *автономии*, и в преобладающей степени, – в первую очередь, для воздушных систем. Краткий обзор основан исключительно на *зарубежных мнениях** о комплексной проблематике автономии как есть.

II. Зарубежные мнения о тенденциях развития беспилотных авиационных систем: элементы анализа прикладных разработок и их применения

Целевая установка — исключить человека из непосредственного, прямого взаимодействия и по возможности заменить его более эффективными автономными беспилотными системами.

Это стремление отражает необходимость сохранения ограниченных человеческих ресурсов (сил) и преодоления сложноустранимых уязвимостей, как усталость, стресс и ограниченные возможности обработки и объединения больших объёмов данных из различных источников и датчиков. Хотя это видение не оформлено в сложившиеся стратегии [*], оно объединяет народное хозяйство и оборонную промышленность вокруг принятия, приобретения и быстрого развертывания передовых технологий, включая возможности на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ), и расширения областей применения беспилотных систем.

Автономия, определяемая как способность системы достигать целей самостоятельно или с минимальным контролем в сложных и непредсказуемых условиях, пока не реализована в должной мере. Основная причина этого заключается в том, что необходимые технологии, в частности ИИ, ещё

не достигли требуемого уровня развития. Кроме того, официальные законодательные или политические определения «автономии» и «автономных систем вооружения» всё ещё продолжают своё формирование. Весьма часто используется термин «автономные системы» взаимозаменяемо с «беспилотные системы» или платформы, оснащенные базовыми автономными функциями, такими как навигация или нацеливание.

Текущее развертывание ИИ является частичным по охвату, улучшая определенные функции и решая некоторые операционные проблемы, а не обеспечивая полную автономию системы.

Основополагающей технологией для перехода от автоматизированных к автономным системам или системам, которые могут решать, как определять и достигать цели, а не просто выполнять запрограммированные человеком алгоритмы является ИИ. Несомненно [*], ИИ значительно улучшает определенные функции, такие как анализ отснятого материала посредством беспилотных авиационных систем (БАС) и распознавание целей, отслеживание целей и автономная навигация, включая навигацию последней мили и анализ звука и текста для извлечения искомых данных (метаданных), где ИИ заменяет большую часть труда человека. Хотя такие системы могут работать без прямого контроля со стороны человека, они, как правило, не выполняют процесс поиска, выбора и поражения целей самостоятельно.

Зарубежные силы, как следует из источников [*], широко используют малые и средние БАС с видом от первого лица (FPV) в качестве платформ, которые можно быстро адаптировать для различных миссий с помощью модульной конструкции и сменного оборудования.

К примеру, [*], в отличие от США, на Украине БАС классифицируются по структурной конфигурации, грузоподъёмности и диаметра пропеллера. Так, 7-дюймовые FPV-дроны изначально были распространены из-за простоты сборки, но изменение эксплуатационных требований сместили предпочтения в сторону 9-10-дюймовых квадрокоптеров, способных нести более тяжелую полезную нагрузку и достигать большей дальности. Добавление целевой нагрузки (штатного полезного груза или, например, самодельных средств поражения) и механизма их сброса, различных датчиков или оборудования для ретрансляции сигналов на ту же платформу FPV может модифицировать возможности решения текущих задач: для одноразового применения; доставки различных грузов без посадки; как средств сбора сведений, наблюдения и рекогносцировки (ISR); или релейный узел. Этот модульный подход, который позволяет быстро адаптироваться к различным миссиям путём замены компонентов, делает FPV-дроны востребованным гибким и масштабируемым активом.

Оборонная промышленность противоборствующей стороны разрабатывает автономное программное обеспечение на основе технологий ИИ, которое может быть интегрировано на различных платформах для расширения автономности при применении по назначению [*].

Это программное обеспечение обеспечивает ключевые автономные функции, такие как восприятие окружающей среды, распознавание целей и навигация, включая подход к цели на последней миле. Оно поставляется в автономных модулях, состоящих из компактных чипов со встроенным программным обеспечением и иногда камерами. Эти модули могут быть интегрированы в ряд платформ, от небольших FPV-дронов и ударных БАС большой дальности до турелей, установленных на беспилотных наземных транспортных средствах. В результате разработчики сосредотачиваются на реализации отдельных автономных функций, обеспечивая при этом их совместимость на нескольких платформах и беспилотных системах.

Оборонная промышленность противоборствующей стороны, по мнению зарубежных специалистов [*], преимущественно придерживается подхода обучения небольших моделей ИИ на небольших наборах данных, а не разработки больших всеобъемлющих моделей.

Этот подход обеспечивает быструю и эффективную бортовую обработку на ограниченной вычислительной мощности небольших и недорогих чипов, которые можно быстро обновлять, переобучать и модернизировать для адаптации к изменяющимся условиям. Эти наборы данных могут быть собраны в ходе реальных операций компании или из открытых данных социальных сетей. Специалисты могут отфильтровывать или отбирать крайне релевантные наборы данных из

более широкого набора специальных данных потребителя и позволять разработчикам обучать свои модели в защищенной специализированной среде.

Делегирование распознавания целей системам автоматического распознавания целей (ATR) с поддержкой ИИ на борту беспилотных платформ снижает человеческие ограничения и позволяет эффективно захватывать цели на расстоянии величины порядка/до 2 км [*].

Автоматизируя идентификацию оборудования и обнаружение объектов, БАС облегчают нагрузку на эксплуатирующий персонал, подверженный усталости, стрессу или изменчивости навыков. Нынешние достижения расширили диапазон распознавания целей с 300 метров до, в среднем, 1 км при взаимодействии и до 2 км в оптимальных условиях. Программное обеспечение с ИИ противодействует «приманкам» и камуфляжу, которые способны обмануть человеческое зрение. Поскольку противоборствующие стороны совершенствуют тактику уклонения, модели ATR с элементами ИИ требуют регулярного обновления данных для поддержания адаптации и точности в меняющихся условиях.

Автономная навигация повышает результативность ориентировочно в три – четыре раза [*]. Устраняя необходимость в постоянном ручном управлении и стабильной связи – оба из которых уязвимы для средств радиоэлектронной борьбы и отсутствия навыков оператора – БАС с автономной навигацией могут повышать результативность поражения цели с 10–20 процентов до 70–80 процентов. Хотя точность может быть недостаточно высока, когда она будет находиться в «разумном радиусе», а не в конкретной точке на цели, автономная навигация снижает уровень требований к квалификации оператора и делает подобные БАС с навигацией на основе ИИ более доступными для менее квалифицированных операторов.

Внедрение БАС, оснащённых возможностями автономной навигации с поддержкой ИИ, приводит к заметному снижению общих затрат на их применение за счёт минимизации как неизбежных потерь беспилотных средств, так и повторных попыток выполнения миссии.

В результате более эффективного выполнения миссии эти системы часто могут достигать [*как здесь, так и везде по тексту используются заимствованные оценки из ряда мнений] целей, используя всего лишь один или два беспилотного средства на цель, а не как ранее – до восьми и более. Кроме того, в случае реализации, интеграция полностью автономного полёта – от взлёта до выполнения миссии и посадки – превращает теперь предыдущие системы уже многоразовыми и существенно снижает необходимость в частом пополнении оборудования.

Разработчики, программисты и инженеры с той стороны всё чаще используют технологии с открытым исходным кодом и существующие известные модели компьютерного зрения для существенного ускорения исследований и разработок при сохранении низкого уровня затрат.

Интегрируя легкодоступные программные решения, включая фреймворки компьютерного зрения с открытым исходным кодом, разработчики могут быстро создавать и развертывать автономные функции. Этот подход особенно выгоден для «атрибутируемых» или расходных платформ, где преимущества минимизации как затрат на единицу, так и затрат на разработку часто перевешивают преимущества высоконастраиваемых решений [*]. Кроме того, компоненты с открытым исходным кодом облегчают более быстрое прототипирование, постоянные обновления и среду совместной разработки, которая опирается на глобальные исследования, и всё это способствует поддержанию гибкости в современных сценариях.

Шифрование бортового программного обеспечения ИИ позволяет эксплуатантам сохранить ряд технологических преимуществ, затрудняя обратную разработку автономных систем [*].

Хотя противоборствующие стороны в принципе могут сравнительно быстро скопировать аппаратные конструкции, сложное шифрование в программном обеспечении с поддержкой ИИ значительно замедляет прилагаемые усилия по разработке эквивалентных систем. Это преимущество защищённого программного обеспечения позволяет эксплуатантам сохранять некоторые лидерские позиции в автономности БАС. Инвестиции в надёжные протоколы шифрования не только защищают критически важные алгоритмы и данные, но и создают по сути стратегический

сдерживающий фактор против немедленного копирования, усиливая непреходящую ценность высокотехнологичных инноваций в современном противоборстве.

Обучение управлению БАС, оснащенными автономными функциями, теперь можно пройти – всего от получаса или до одного дня, что существенно расширяет доступ к этим средствам.

То, что раньше требовало долгих часов полёта, теперь требует всего нескольких часов, что позволяет более широкому кругу эксплуатантов развивать необходимые навыки с минимальными специализированными знаниями. И поскольку самонаводящиеся системы становятся всё более распространенными, программы обучения эксплуатации БАС всё чаще включают автономное наведение и навигацию в свои учебные планы. Осознавая этот сдвиг, профильные учреждения для обучения операторов БАС наделяют обучаемых навыками работы как с «ручными» функциями, так и с функциями, поддерживаемыми ИИ, часто осваивая автономные режимы в пределах дня. Эта «ускоренная кривая обучения» расширяет потенциал квалифицированных операторов и укрепляет общую оперативную готовность [*].

Власти противоборствующей стороны [*] понимают важность ускорения официального принятия и закупки программного обеспечения и модулей с автономными возможностями.

Как следует из разбираемых публичных источников, ключевые инициативы включают кодификацию этих автономных модулей в соответствии со стандартами НАТО и интеграцию их в соответствующие официальные службы, что обеспечивает масштабирование закупок. Классифицируя эти модули как отдельные компоненты и устанавливая чёткие руководящие принципы для их интеграции и использования, потребители ускоряют сроки закупок и развёртывания. Так [*], в 2024 году противостоящие силы начали закупать бо'льшие объёмы БАС с улучшенными функциями ИИ – предварительный, но значительный шаг к более широкому принятию передовых автономных систем. Хотя «публично озвучиваемые цифры» представляют собой лишь малую часть из «около 2 миллионов беспилотников, построенных на Украине в 2024 году» [*], это показывает растущую приверженность противников всё более автономным и способным реализовывать необходимые функции новым платформам.

Власти противоборствующей стороны [*] всё чаще требуют, чтобы все беспилотные и информационные системы интегрировались с платформами ситуационной осведомленности и корректировки в стремлении создать общую оперативную картину в реальном времени.

Чтобы удовлетворить этот спрос, производители должны гарантировать, что их системы могут бесперебойно обеспечивать передачу массивов данных в общую ситуационную осведомленность и среду командования и управления. При этом не вызывает сомнений, что иностранные поставщики также признают эту необходимость. Например [*], «беспилотники Skydio связаны с системой Delta», а также – «акустическая система Zvook и инструмент анализа текста Griselda, который обеспечивает сбор данных из групповых чатов и перехваченных сообщений», и др. Объединяя эти возможности, противостоящие силы создают всеобъемлющую оперативную картину в реальном времени, которая охватывает как собственных, так и других международных поставщиков технологий двойного назначения.

Для автономности с поддержкой ИИ важно обеспечить решение ключевых задач [*]: «распространение искомых возможностей на наземные, морские и подводные платформы и обеспечение роения для воздушных систем».

Хотя возможности воздушных БАС претерпели значительные изменения в автономных операциях, адаптация аналогичных функций для многодоменного использования требует преодоления ещё более сложных технических и экологических препятствий. Хотя потенциал интеграции автономной навигации в наземные системы значителен, практическая реализация всё ещё остаётся недостаточно исследованной зарубежными оборонными компаниями [*]: в воздушной сфере роение в настоящее время находится на стадии экспериментов малого масштаба; однако полностью реализованные рои, – в которых реализуется коммуникация между средствами, принимаются решения и происходит адаптация совместно, – ещё не реализованы; достижение такой

сложной координации потребует существенных достижений в алгоритмах ИИ, протоколах связи и возможностях принятия решений в реальном времени.

Человеческий надзор остаётся ключевым, особенно для решений о взаимодействии, отражая подход «человек в контуре», который может сместиться в сторону более высокого уровня надзора в будущем, сохраняя при этом человеческий контроль над системой в целом.

Хотя противоборствующие силы стремятся расширить автономию везде, где это может повысить оперативную эффективность, решения о взаимодействии остаются полностью в сфере деятельности человека. Текущие практики «человек в контуре» позволяют операторам переопределять автономные функции, «гарантируя», что критические этические и стратегические суждения остаются под контролем человека. Этот подход закладывает основу для более широкой автономии в будущем, но с постоянным участием человека в ключевых моментах, где неизбежные риски могут достигать самых высоких значений [*].

III. Заключение

В докладе с позиций оценок в *зарубежных мнениях* [*] показана к обсуждению совокупность положений о тенденциях в предметной области *управления и автономии* для современных сложных условий применительно к сложившейся *ситуации прошедшего года*. В то же время *человеческий надзор* по-прежнему остается критически важным и ключевым моментом при принятии решений о взаимодействии перспективных беспилотных систем. Диверсификация, как в приложениях для народного хозяйства [1-7], так и анализ различного рода передовых решений в обозримой перспективе, находит своё отражение на плановых мероприятиях постоянно действующего Общемосковского научного семинара «*Проблемы управления автономными робототехническими комплексами*» (ИПУ РАН, Москва) [www.ipu.ru/robot].

Литература

[1] *Гойденко, В. К.* О прецеденте применения автономного режима наведения беспилотной авиационной системы "STM Каргу-2" / *В. К. Гойденко, А. В. Рожнов* // *Перспективные системы и задачи управления : Материалы XVII ВНПК*. – Таганрог, 2022. – С. 187-192. – EDN NGZHVY.

[2] Исследование проблемных вопросов развития автономных гетерогенных РТК и подготовки кадров наукоёмких специальностей аэрокосмической отрасли / *В. И. Гончаренко, А. В. Рожнов, В. В. Карпов [и др.]* // *Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления*. – 2018. – № 1. – С. 70-76. – EDN XYELNR.

[3] *Шовкалюк, А. П.* Повышение эффективности деятельности научных рот на основе сотрудничества МАИ и ИПУ РАН / *А.В. Рожнов, И.А. Лобанов* // Брифинг "Роль научной роты (вуза) в решении военно-технических задач". – Кубинка: КВЦ "Патриот", 2015.

[4] *Легович, Ю. С.* Системная интеграция и ускоренное макетирование смешанной робототехнической группировки на предпроектной стадии ЖЦ / *Ю. С. Легович, П. В. Миодушевский [и др.]* // CAD/CAM/PDM - 2016. – М.: ООО "Аналитик", 2016. – С. 199-202. – EDN XGZICF.

[5] Identikit of modifiable vehicles at Virtual Semantic Environment / *V. Abrosimov, V. Goncharenko, S. Ryvkin [et al.]* // *Proceedings – 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP* 2017 : 2. – Brasov, 2017. – P. 905-910. – DOI 10.1109/OPTIM.2017.7975085. – EDN XNNRFB.

[6]. *Рожнов, А. В.* Разработка предложений по созданию единых технологий с перспективными источниками энергии в космической отрасли / *А. В. Рожнов, В. В. Карпов* // *MLSD'2016 : Труды 9'й международной конференции*: в 2-х т. Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 150-154. – EDN YGNTOD.

[7] Общемосковский научный семинар «Проблемы управления автономными РТК», ИПУ РАН (Москва, Россия), – URL: *https ://www .ipu .ru/robot*. (дата обращения: 10.06.2024).

Дистанционная диагностика дефектов подшипника микроволновым датчиком вибраций

Д. В. Хаблов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
dkhablov@mail.ru

***Аннотация**. В докладе рассматривается перспективный неразрушающий метод обнаружения и классификации дефектов подшипников с помощью микроволновых датчиков. Датчики осуществляют облучение вибрирующего объекта микроволновыми волнами, прием отраженных волн, выделение фазовых измерений между ними, соответствующих перемещению поверхности при вибрации. Полученный сигнал мы используем для мониторинга дефектов подшипников качения с разными параметрами по наличию в нем характерных высокочастотных импульсов. Поскольку эти импульсы обычно зашумлены посторонними маскирующими вибрациями, применяем специальную обработку сигналов. Для этого мы получаем спектр огибающей и исследуем его на наличие сигналов с повышенным эксцессом с помощью сканирования спектра эксцесса. Затем, если такой сигнал получен, определяем параметры полосового фильтра и с его помощью выделяем нужный сигнал. По центральной частоте этого дефектного сигнала определяем сам дефект после сравнения с эталонными значениями.*

I. Введение

В производстве, везде, где задействовано большое количество машинного оборудования, важное значение имеет своевременное профилактическое обслуживание действующих агрегатов на предмет исправности и отсутствие дефектов. В некоторых случаях часто необходимо использовать не только регламентное, но и перманентное наблюдение за их состоянием. Это касается особо опасных производств, в том числе в атомной промышленности, химической промышленности и везде, где используется непрерывный цикл производства или оборудование с высокой стоимостью. Наиболее важными объектами контроля состояния в оборудовании являются подшипники, вовремя не обнаруженные дефекты в которых могут привести к серьезным авариям. Отсюда возникает потребность поиска дефектов в подшипниках непрерывно и дистанционно, вследствие невозможности во многих случаях установки контактных датчиков.

В работе исследуется возможности применения микроволновых доплеровских датчиков для дистанционной бесконтактной диагностики и локализации дефектов по вибрации с моделированием. В качестве датчика вибрации мы используем двух-антенный датчик СВЧ диапазона с квадратурной обработкой отраженного сигнала [1]. Благодаря этому после специальных вычислений мы получаем сигнал вибрации в единицах реального перемещения. В дальнейшем, благодаря использованию априорных данных о дефектах и локализации на исследуемом подшипнике, производим анализ вибрации с выделением гармоник, ответственных за определенный дефект. По их наличию или отсутствию мы определяем конкретный дефект или подтверждаем исправность подшипника.

II. СВЧ датчик вибрации с квадратурной обработкой отраженного сигнала

Рассмотрим принцип действия доплеровского датчика перемещений, реализующий интерферометрический метод измерения. СВЧ генератор датчика излучает непрерывный сигнал $S(t)$ с частотой f_0 и фазой φ_1 в направлении некоторой плоской поверхности.

$$S(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_1) \quad (1)$$

Если эта поверхность перемещается или вибрирует со скоростью v в радиальном направлении по отношению к направлению излучения, то отраженный сигнал $R(t)$ изменит свою частоту и фазу в соответствии с формулой:

$$R(t) = cos2\pi\left[\left(f_0 \pm \frac{2v}{\lambda_0}\right)t + \varphi_2\right] \quad (2)$$

где $\lambda = c/f_0$ – длина волны электромагнитного колебания, c – скорость света, φ_2 - фаза отраженной волны, зависящая от расстояния, отражающих свойств поверхности и фазового шума. Доплеровская частота вибрации $f_D = (2vf_0) / c$, частота принимаемого сигнала равна $f_0 \pm f_D$, а собственно выходной сигнал после фазового детектирования сигналов (1) и (2) будет соответствовать выражению

$$R_\varphi = \cos(\pm 2\pi f_D t + \Delta\varphi) \quad (3)$$

При облучении вибрирующего объекта в виде плоской поверхности СВЧ излучением, фаза отраженного сигнала $\Delta\varphi$ из (3) приобретает модуляцию, линейно связанную с законом плоскопараллельных колебаний вибрирующей поверхности $x(t)$:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi x(t)}{\lambda} \quad (4)$$

На Рис.1 представлена упрощенная схема доплеровского СВЧ датчика перемещений для измерения параметров вибраций от плоской вибрирующей поверхности с использованием двухканального квадратурного преобразования принимаемого сигнала. Эти же выражения в первом приближении можно использовать и для оценки вибраций поверхностей иной формы.

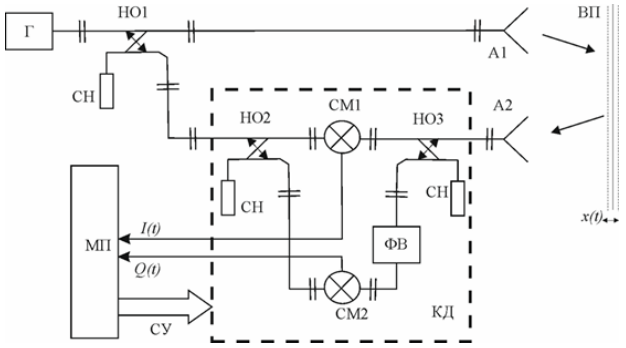


Рис. 1. Структурная схема СВЧ датчика для измерения параметров вибрации

Работа датчика осуществляется следующим образом. Электромагнитные волны СВЧ с длиной волны $\lambda = c/f_0$ направляются антенной А1 в направлении вибрирующей поверхности ВП, отражаются от неё и принимаются приемной антенной А2. Затем принимаемые волны преобразуются в комплексный вид благодаря использованию двухканальной схемы демодуляции на смесителях СМ1 и СМ2 с направленными ответвителями НО1, НО2 и НО3. В смесителе СМ2 происходит добавление фазы в 90° в фазовращателе ФВ за счет использования линии задержки $\lambda/4$. Такая схема позволяет реализовать преобразование сигнала в аналитической форме. В результате, с выходов смесителя на вход МП поступают квадратурные сигналы $I(t)$ и $Q(t)$ с амплитудами А1 и А2 в относительных единицах (см. Рис.1) [1]:

$$I(t) = A_1 \sin\varphi(t), \quad Q(t) = A_2 \cos\varphi(t) \quad (5)$$

где $\varphi(t)$ – мгновенное значение фазы отраженного сигнала. При достижении равенства амплитуд $A_1 = A_2 = A$, из уравнений (5) можно вычислить по формуле:

$$\varphi(t) = \arctan[I(t)/Q(t)]$$

Поскольку эта фаза связана с перемещением вибрирующей поверхности $x(t)$ и длиной волны λ выражением (4), получим уравнение для определения перемещения в метрах при вибрации:

$$x(t) = \lambda\{\arctan[I(t)/Q(t)]\}/4\pi \quad (6)$$

Амплитуда отраженного сигнала непосредственно не участвует в определении параметров вибрации, что значительно повышает точность и помехозащищенность измерения. Кроме этого, отпадает необходимость предварительной калибровки, что упрощает и ускоряет процесс измерения. Для того чтобы датчик вибрации работал корректно необходимо компенсировать возможные рассогласования в каналах $I(t)$ и $Q(t)$ демодулятора. Условием согласования является непрерывное во времени сохранение равенства модуля принимаемого аналитического сигнала $M(t)$ единице, вычисляемого блоком управления МП для подстройки амплитуды в канале второго смесителя (см. Рис.1):

$$M(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2} = 1$$

Описанный метод обладает преимуществом перед традиционными контактными методами, поскольку измеряет вибрацию в единицах перемещения, а не ускорения, что более правильно при оценке износостойкости. Метод может быть более удобен для диагностики подшипников при текущих измерениях и на стадии контроля дефектов при производстве, поскольку отсутствует необходимость прямого контакта с движущимися механизмами.

III. Признаки неисправности в сигналах вибрации подшипников

Когда тела качения в подшипнике ударяются о локальный дефект на наружном или внутреннем кольце обоймы, а также когда дефект на теле качения ударяется о наружное или внутреннее кольцо, возникают вибрационные резонансы в виде коротких высокочастотных импульсов [2]. Выделяя эти импульсы из общего спектра вибрации, можно обнаружить тот или иной дефект или деградацию в подшипнике. Для этого используют данные об известных типах дефектов для шарикоподшипников стандартных конструкций, собранных в [3]. Также можно выделить четыре наиболее часто встречающихся деградации в виде появления в спектре вибрации дефектных частот с относительно небольшой полосой W, отсутствующих в спектре при нормальной работе подшипника. Это: частота передачи шарика от внешней обоймы - F_o, частота передачи шарика от внутренней обоймы - F_i, основная частота передачи обоймы F_c и частота передачи от вращения шарика (ролика) F_b. Эти дефектные частоты можно вычислить по следующим формулам:

$$F_o = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_p}\cos\beta\right) \quad F_i = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_p}\cos\beta\right)$$

$$F_c = \frac{f_r}{2}\left(1 - \frac{D_b}{D_p}\cos\beta\right) \quad F_b = \frac{D_p}{2D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_p}\cos\beta\right)^2\right]$$

Здесь n – число шариков(роликов) в подшипнике, f_r – частота вращения (Гц), D_b – диаметр шарика (см), D_p – средний диаметр дорожки качения (см), β – угол соприкосновения шарика (ролика) с обоймой. Каждая из этих дефектных частот является центральной с полосой частот собственных гармоник [F-W/2, F+W/2], $W \approx 10\%$ от f_r.

На рис. 2 представлены примеры расположения на спектре вибрации дефектных частот для подшипника с размерами: $n = 8$, $D_b = 2$, $D_p = 12$, $\beta = 15$, при частоте вращения $f_r = 25$ Гц. Частота f_r масштабируется для конкретных условий.

IV. Обнаружение дефектных частот в сигналах вибрации подшипников

Выделение информативных сигналов о дефектах при анализе вибрации от вращающихся объектов требует специальной обработки. Неисправности в подшипниках качения приводят к появлению серии коротких импульсных откликов, когда элементы качения ударяют по дефектам на дорожках качения. Полезные сигналы проявляются в виде коротких импульсов с неоднородным эксцессом на фоне частотного шума от сильных маскирующих сигналов других движущихся компонентов машин. В случае использования бесконтактного измерения СВЧ датчиком соотношение сигнал/шум значительно меньше, чем при контактном измерении. Поэтому для выделения

дефектных частот будем применять специальную обработку сигнала на основе спектрального эксцесса — статистического параметра, указывающего, как импульсивность сигнала изменяется в зависимости от частоты [4].

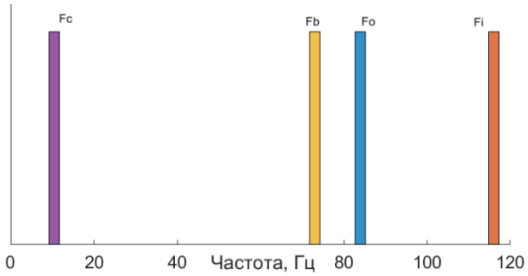


Рис.2. Дефектные частоты подшипника

Эксцесс потенциально полезен для определения частотных диапазонов, в которых доминируют сигналы дефектов подшипников, которые обычно содержат резонансные частоты, возбуждаемые дефектами. Эта информация требуется для выбора оптимальной частотной полосы для демодуляции, чтобы выполнить анализ огибающей сигналов подшипников. Сигнал огибающей, полученный путем амплитудной демодуляции, содержит необходимую информацию о частоте повторения ударов или любой другой модуляции, вызванной прохождением дефекта через зону столкновения [4].

Моделирование процесса обработки сигнала вибрации состоит из трех этапов. Мы проводим исследование на основе поиска дефекта внешнего кольца обоймы подшипника (см. гл.3) с самым малым эксцессом – [F_o-W_o/2, F_o+W_o/2] и сильными маскирующими случайными частотными, амплитудными и фазовыми модуляциями. Сначала определяем спектр огибающей сформированного сигнала, представленный на Рис.3.

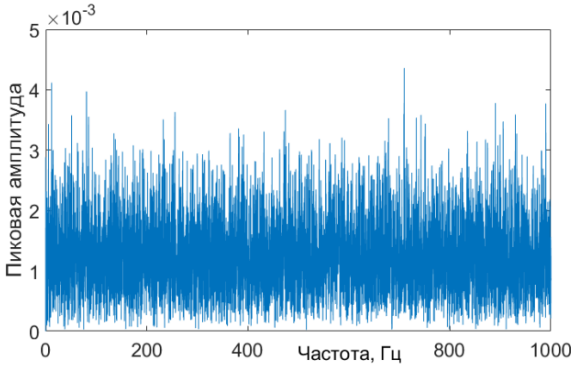


Рис.3. Спектр огибающей сигнала вибрации
с дефектом внешнего кольца подшипника

Из графика видно, что гармоники дефектного сигнала выделить невозможно. Поэтому на втором этапе мы определим параметры полосового фильтра для выделения дефектного сигнала из огибающей. Для этого строим спектрограмму эксцесса этой огибающей (см. Рис.4). Из спектрограммы определяем параметры максимального сосредоточения энергии в спектре эксцесса огибающей: K_{max} = 2,7083 на уровне 6, оптимальная длина окна l = 128, центральная частота f_c= 2,6703 кГц, ширина полосы b = 0,76294 кГц.

На последнем этапе пропускаем огибающую вибрационного сигнала через цифровой фильтр с указанными параметрами и в результате получаем существенное повышение соотношения сигнал/шум (см. Рис.5).

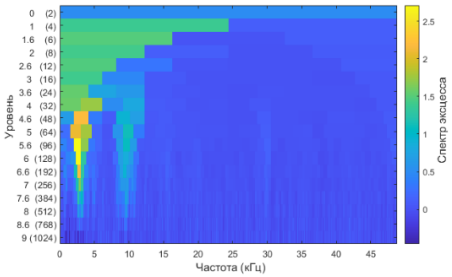


Рис. 4. Спектрограмма эксцесса огибающей сигнала вибрации с дефектом

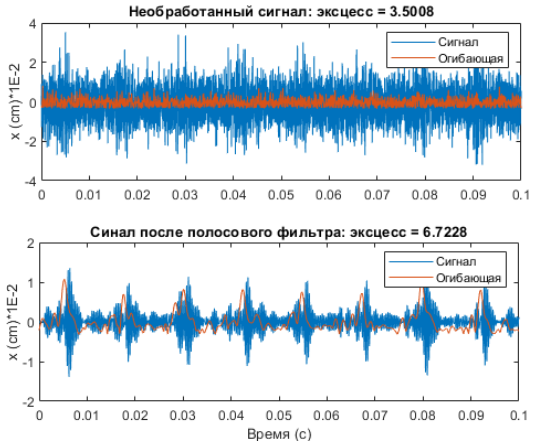


Рис. 5. Вибрационный сигнал до и после прохождения через полосовой фильтр f_c, b

Теперь зная параметры подшипника (см. гл.3) можно сопоставить вычисленную дефектную частоту и сравнить ее с вычисленной по соответствующей формуле, или из базы данных для локализации дефекта. В результате определяем центральную частоту F = 83,9 Гц. При сравнении находим, что измеренная частота соответствует дефекту внешнего кольца обоймы F_o (см. Рис.2).

V. Заключение

Моделирование процесса бесконтактной диагностики с использованием СВЧ датчиков и обработкой сигнала вибрации с использованием сканирования спектра эксцесса огибающей показало возможность реализации этого перспективного метода на практике. Дистанционный мониторинг нормальной работы движущихся механических механизмов, особенно такого важного элемента как подшипник повышает безопасность, экономичность и оперативность использования на многих производствах в химической, атомной и энергетической промышленности. Контроль дефектов при этом может происходить в самых жестких условиях при повышенной температуре, радиации, опасной загазованности, без прямого участия человека при обслуживании и ремонте контактных датчиков и не оставляя ради этого производство.

Литература

[1] *D.V. Khablov*, “Remote diagnostics of vibrations of dynamic objects using Doppler microwave sensors”, *Measurement Techniques*, Vol. 63, No 9, 2021, pp. 729-735.

[2] *Randall, B. Robert, and A. Jerome*, "Rolling element bearing diagnostics—a tutorial." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, Number 2, 2011, pp. 485-520.

[3] *E. Bechhoefer*, “Condition Based Maintenance Fault Database for Testing Diagnostics and Prognostic Algorithms.” 2013. *https://www.mfpt.org/fault-data-sets/*

[4] *J. Antoni*, "The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals." *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 20, Number 2, 2006, pp. 282–307.

Characterization of simulation models of complex systems

O. M. Demidenko, A. V. Varuyeu, E. V. Rafalava, V. A. Prokhorenko
Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus,
demidenko@gsu.by

Abstract. *The article addresses an investigation of characteristics of simulation models suggesting the following sequence of actions: assessment of simulation error due to imperfections of pseudorandom-number generators used in simulation models; determination of simulation time needed to achieve the desired simulation precision; assessment of resiliency of simulation results (Y) at different changes of parameters (X) and at given values of variables (G); assessment of sensitivity of simulation results to changes of model parameters (X) and assessment of simulation raw data (G).*

I. Introduction

Characterization of simulation models of complex systems shall determine the following aspects: simulation precision (ε_n), simulation transition period (T_{tp}), simulation resiliency (UST). Any testing of a simulation model of complex systems starts from these procedures. Let's review the technology of implementation of these three procedures.

Generators of pseudorandom numbers, uniformly distributed within the interval [0, 1], known as base generators, are used in any probabilistic simulation model of complex systems. The simulation system provides the user with several different base generators. These generators and the very probabilistic nature of the simulation model are the sources of imitation errors.

To check the quality of the generators, there are descriptions of tests of such base generators in the documents on the simulation system. Sometimes, it is a challenge to choose, which of the base generators suits better for the particular use.

II. Procedure for simulation error determination

The following procedure for determination of simulation error approved on different simulation models is suggested. A series of runs of simulation models ($k \le 30$) with same values of parameters and variables (X and G), but with different initial values of base generators (ξ_{okm}, k – run number, m – base generator number), forms in the midpoint of the change region of control parameters $\{X\}$. [1]

The values of the n^{th} component of response vector Y_{nk} are determined in each run. As the result, a fetch of responses is formed $\{Y_{nk}\}$. The fetch is assessed for the expected value and the dispersion ($\overline{Y}_n$, D_n).

The confidence interval of determination of the actual value of the expected value of the n^{th} component (Y_{hn}) is established. Let's assume normality of deviation distribution from $\overline{Y}_{hk}$ to $\overline{Y}^*_{hn}$.

Since the sizes of fetches are small ($N \le 30$), t-statistics with Student's distribution is used to determine confidence intervals (1).

$$t = \left(\overline{Y}_h - \overline{Y}^*_{hn}\right)\sqrt{\frac{N-1}{D_n}}, \tag{1}$$

With the significance level ($\alpha = 0.05$) and probability 0.95 taken as an example Y^*_{hn} is assumed within:

$$\overline{Y}_n - t_{0.05}\sqrt{\frac{D_h}{N-1}} \le Y_{hn} < \overline{Y}_n + t_{0.05}\sqrt{\frac{D_h}{N-2}}, \tag{2}$$

where $t_{0,05}$ is the t-statistics value at (N–1) degrees of freedom and significance level α =0.05.

Thus, the error may be determined for each component by the following formulae: (3)

$$\alpha_n = t_{0.05}\sqrt{\frac{D_h}{N-2}} \tag{3}$$

It shall be noted, that the minimum number of simulation experiments shall be equal to 30. In this case, the error with confidence $\beta = 0.95$ is $\varepsilon = 0.753\ S_n$ (were S_n is the mean square value of the fetch with the

size of $N = 30$), which is the upper value of the error due to probabilistic nature of the simulation model and use of base generators of pseudorandom values.

Should the error be too high, the investigator shall review the composition of generators and the procedure of their use in the simulation model of complex systems. These cases require use of a higher number of base generators with a guaranteed quality of simulation of ξ_{okm}.

III. Approbation of assessment of response sensitivity of imitation models of complex systems

Assessment of sensitivity of the results of simulation modeling consists of determination of the range of changes in the responses of the simulation model $\{Y_j\}$ depending on the changes in the set of parameters of the simulation model $\{X_k\}$ over the entire range of their change.

Depending on the range of changes of the responses {Yj}, the future strategy for operating the simulation model is determined. If at insignificant amplitude of vector components (even in the entire change range from X_{umin} to X_{max}) the response Y_j changes insignificantly, it means that the representation precision Y_j in the simulation model is of small importance. Then this response shall not be used as the key one for simulation experiment designing, or may even be discarded at implementation of the series of simulation experiments on the simulation model. At the same time, if the response Y_j is highly sensitive to changes of the parameter X_k, it directly confirms the need to represent it in the simulation model with the maximum possible precision.

The procedure for determination of sensitivity of the simulation results is as follows. Let each q^{th} component of the parameter vector $\{X_q\}$ deviate from its value at the central point in both directions by the length of the selected interval of its change ($\min X_q$, $\max X_q$). And let the remaining components of the vector $\{X_q\}$ remain unchanged and correspond to the central point in the parameter space.

A pair of model experiments is performed for the specified values of the parameter vector $\{X_q\}$ and the values of the j^{th} response, denoting them as Y_j^- (for X_{qmin}) and Y_j^- (for X_{qmax}), are calculated. The coefficient of sensitivity of response Y_j to the changes of parameter X_q is calculated by the formula:

$$\delta Y_{kj} = \frac{\left|Y_j^+ - Y_j^-\right| \cdot 2 \cdot 100\%}{\left(Y_j^+ + Y_j^-\right)}, \tag{4}$$

where Y_j^+ and Y_j^- are the changes of response Y_j at change of parameter X_q respectively to the maximum and the minimum of its changes within the entire range. Then the sensitivity matrix of responses $\left\| \delta Y_{kj} \right\|$ is constructed, where the q^{th} line corresponds to the changes of the component of the parameter vector X_q in the dynamics of changes of its values, while the j^{th} column corresponds to the number of the component of the vector of the response of the simulation model. δY_{kj} is calculated by the following formulae (4).

Then the content of the matrix $\left\| \delta Y_{kp} \right\|$ is analyzed as follows. Each component of the matrix is verified for trueness of inequality:

$$\delta Ykj \ \leq \ \xi u\%, \tag{5}$$

where ξ_u % is the maximum error of simulation of the variants of the simulation model of the complex system. The Boolean matrix $\left\| \gamma_{kj} \right\|$ is formed, where:

$$\gamma_{kj} = \begin{cases} 0, when\ the\ inequelity\ is\ true \\ 1, otherwise \end{cases}, \tag{6}$$

If the k^{th} line of the matrix is zero, it means that the component of the parameter vector in the given variant of the complex system simulation model affects almost all components of the response vector $\{Y_j\}$ and the parameter in this study may be discarded. As the result, the number of the vector component of the parameter of the complex system simulation model is minimized. [2]

While, if the j^{th} column of the matrix γ is equal to zero, it means that the given study may discard the j^{th} component of the response vector of the simulation model. Thus, the number of responses of the complex

system simulation model at the given composition of the remaining variables of the simulation $\{G\}$ is minimized.

It's useful to range all responses to have the responses with the maximum values δY_{kj} on the left side. Let's name all responses, for which the inequality (5) is not satisfied, the main ones, and the remaining responses - the minor ones (for the specific value of the parameter vector component).

The parameters for the Y_j^{th} component of the response vector are ranged in a similar manner. Similarly, let's name all parameters, for which the inequality (5) is satisfied, significant, and the remaining parameters - insignificant.

Obviously, only the main parameters shall be involved in experiment designing at subsequent stages of operation of the complex system simulation model (the investigator shall pay attention to cross-coupling effect of the main responses with the significant parameters).

IV. Conclusion

This article considers the following aspects of the technology of process characterization of the complex system simulation model: assessment of the precision of the simulation model program; determination of the confidence interval of the mathematical expectation of the nth response component; determination of the length of the simulation transition period, assessment of simulation stability; implementation of the rules for automatic termination of the simulation.

Steps are proposed for the technology of sensitivity assessment of the complex system simulation model covering calculation of coefficients of response sensitivity to parameter variations; development of the matrix of coefficients of sensitivity; rejection of the composition of responses and parameters using the coefficients of sensitivity of the simulation model.

References

[1] *Demidenko, O.M.,* Tools and technique of monitoring resource distribution for design simulation of organization of information processing, *Journal of automation, mobile robotics & intelligent systems,* Volume 3, № 4, 2009, pp. 118-120.

[2] *Demidenko, O.M., Kucherov A.I.,* Comparative analysis of mathematical methods to improve the reliability of the information and technical systems, *Scientific and technical journal «Problems of physics, mathematics and technics»,* Volume 22, № 1, 2015, pp. 92-97.

Разработка и создание клиент-серверного приложения на языке C++/Qt

А. А. Быстревский, С. А.Лукашевич
Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь,
bustrik1603@gmail.com, lukashevich@gsul.by

Аннотация. *В данной работе рассматривается процесс разработки клиент-серверного приложения для обучения английскому языку в формате интерактивной викторины. Разработка выполнена на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt для реализации графического интерфейса пользователя и обеспечения сетевого взаимодействия. Серверная часть написана с применением низкоуровневых сокетов и осуществляет обработку соединений от клиентов, управление игровыми сессиями и передачу заданий.*
В проекте реализованы модули для работы с базой данных PostgreSQL, где хранятся вопросы викторины, их категории, уровни сложности, а также результаты пользователей. Разработан механизм генерации уникальных сетов вопросов, единых для всех участников игровой сессии, с обеспечением случайности и неповторяемости. Обмен данными между клиентом и сервером осуществляется в формате JSON, что обеспечивает гибкость структуры сообщений и простоту их обработки.
Особое внимание уделено решению проблемы доступа к серверу из внешней сети с помощью технологий туннелирования. Реализовано тестирование приложения в различных условиях, продемонстрированы стабильность соединения и корректность обработки данных. Работа может быть использована в качестве основы для создания полноценных образовательных систем, систем онлайн-тестирования и интерактивного обучения.

I. Введение

В условиях цифровизации образования возрастает потребность в эффективных, доступных и увлекательных инструментах обучения. Особое внимание уделяется интерактивным методам, повышающим вовлечённость пользователей. В данной работе рассматривается процесс разработки клиент-серверного приложения для изучения английского языка в формате викторины. Программа реализована на языке C++ с использованием фреймворка Qt для клиентской части и PostgreSQL в качестве СУБД. Серверная часть построена с применением сокетов TCP и обрабатывает многопользовательские сессии.

Преимуществами разработанной системы являются: поддержка многопользовательской игры, автоматическая генерация случайных наборов вопросов, возможность использования в локальной и глобальной сети, расширяемость функциональности.

II. Архитектура и реализация

1. Общая структура приложения

Приложение состоит из трёх основных компонентов:

1. клиентская часть (Qt GUI) – интерфейс пользователя, отправка и приём JSON-сообщений;
2. сервер – управление сессиями, обработка команд, генерация наборов вопросов;
3. база данных (PostgreSQL) – хранение пользователей, вопросов, сессий, наборов.

Схема связи между компонентами изображена на Рис. 1. Показана схема разбиения сервера на несколько потоков, для распараллеливания клиента во избежание пересекания запросов, также на схеме продемонстрирована отправка json запросов к клиенту и обратно.

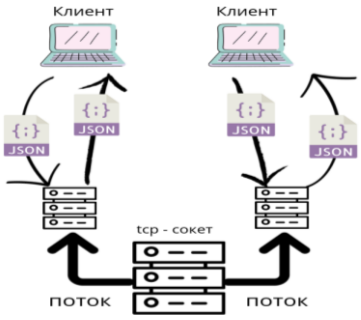


Рис. 1. Архитектура приложения

На Рис. 2 изображена структура таблиц и связь их между собой в базе данных.

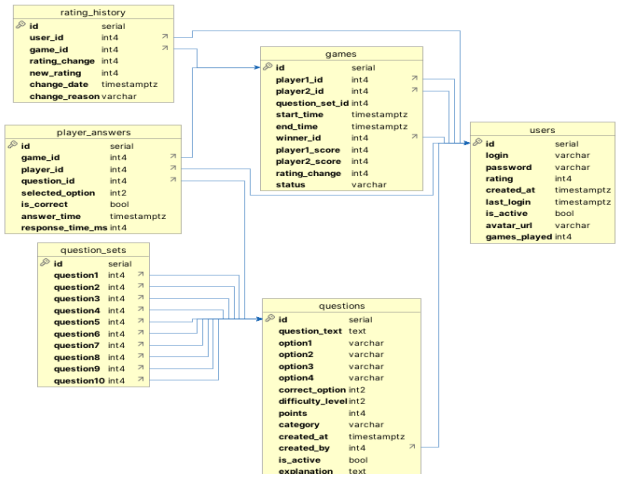


Рис.2. Архитектура базы данных проекта, продемонстрирована взаимосвязь компонент благодаря использованию внешнего ключа

На Рис. 3 приведена часть кода реализации сервера.

```
else if (action == "start_game") {
    response = handle_start_game(client->user_id, client->login);
}
else if (action == "submit_results") {
    int game_id = request->asInteger("game_id");
    int score = request->asInteger("score");
    response = handle_game_results(game_id, client->user_id, score);
}
else if (action == "check_queue_status") {
    response = check_queue_status(client->user_id);
}
```

Рис. 3. Фрагмент кода сервера (приведен пример входящих запросов и парсинг их для выполнения манипуляций с полученными данными от клиента)

На рисунке 4 приведен пример работы приложение, для отладки запустим приложение на одной машине.

Рис. 4. Пример игрового процесса после запуска двух клиентов

III. Заключение

В ходе выполнения работы разработано и протестировано клиент-серверное приложение, позволяющее организовывать викторины по английскому языку. Использованные технологии обеспечили производительность, расширяемость и стабильную работу сервиса. Реализована безопасная и удобная архитектура взаимодействия с пользователем и базой данных.

Программа может быть использована в учебных учреждениях, онлайн-курсах и корпоративных тренингах. В перспективе возможна интеграция с платформами дистанционного обучения и расширение набора функций – рейтинг пользователей, адаптивная сложность, аналитика.

Литература

[1] *Е. Р. Алексеев, Г. Г. Злобин, Д. А. Костюк, О. В. Чеснокова, А. С. Чмыхало*. Программирование на C++ в среде Qt Creator. M.: Библиотека ALT Linux, 2015. – 448 с.

[2] *В. Стивенс* Сокеты в Unix. Программирование сетевых приложений. СПб: БХВ-Петербург, 2007. – 512 с.

[3] *Х. Бидж* Beej's Guide to Network Programming [Электронный ресурс]. – Режим доступа: *https://beej.us/guide/bgnet/*

[4] *Э. С. Таненбаум, Д. Дж. Уэзеролл*. Компьютерные сети. 5-е изд., СПб: Питер, 2013. – 960 с.

Formalization of the computational process in a local area network node using informative coloring of user resource requests

O. M. Demidenko, V. N. Kulinchenko, Y. M. Nikitjuk, A. I. Kucharau, D. S. Sych
Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus,
demidenko@gsu.by

Abstract*. This article describes formalization of the computational process in a local area network node by using complex structure transaction, in the "body" which there are information-colored structure of the workload.*

I. Introduction

When compiling the formal description of the system, the investigator is recommended to perform the following sequence of actions: clarification of the system decomposition; algorithmization of the model components; information coupling of the model algorithms; establishment of control links between the model components; clarification of interaction with the control program of the simulation; documentation of the stage.

This article considers development of the simulation model of the computational process of the local area network (LAN) node for the case, when the simulation model is used to adapt the workload to the resource composition of the LAN node.

Formalization of the computational process of the LAN node by using complex structure transactions, the "body" of which contains the information-colored structure of the workload on the LAN node, is suggested.

II. Formalization of the workload for adaptation to the existing resource composition of the LAN node

If the study subject is a computing process on the local area network node, which is a server, then the dynamics of the resource usage by user requests is difficult to represent using the semi-Markov model. [1]

Therefore, let's represent the flow of user requests for resources F to the LAN server in the dialog (DR) and the distant (DIS) modes using the corresponding time diagrams (TD DR_j and TD DIS_j) of the processor (CPU_j) and the memory (HDD_j) use.

The following parameters of simulation of DR and DIS modes are determined using time diagrams:

time of servicing of the k^{th} user requests by the server (τ_{Djk});

intervals of CPU_{Lj} and HDD_{Lj} use respectively (Δt_{11jk} and Dt_{12jk}) during the k^{th} request servicing cycle of the DR mode;

number of uses of CPU_{1j}(n_{11j}) and HDD1j(n_{12j}) in the DR mode;

intensity of requests from DIS(Tj) mode users to the server;

intervals of CPU_{2j} and HDD_{2j} use respectively (Δt_{21jk} and Dt_{22jjk}) during the request services of the DIS mode;

number of CPU_{2j}(n_{21j}) and HDD_{22}(n_{22j}) uses in the DIS mode.

The time intervals and the number of CPU_j and HDD_j uses, as well as the duration of the server use cycle in the DR and DIS modes (Δt_{11jk} and Dt_{12jk}) are random values. Therefore, the dynamics of the LAN server resource use are respresented as follows:

$F_{11j}(\Delta t)$ – $F_{12j}(Dt)$ –distribution functions of use duration of CPU_j and HDD_j respectively in the DR mode;

$F_{21j}(\Delta t)$ – $F_{22j}(Dt)$ –distribution functions of use duration of CPU_j and HDD_j use respectively in the DIS mode;

$\bar{\tau}_{Dj}$ – mean value of the user interaction cycle in the dialog mode;

$\lambda_{1j} = 1/\bar{\tau}_{Dj}$ – intensity of incoming dialog requests from users (resource requests are assumed to arrive at equal intervals) in the DR mode;

$p_{Dj} = \dfrac{n_{12j}}{n_{11j}}$ – probability of HDD_j use in the interaction cycle of users' dialog requests;

$\bar{\tau}_{Tj}$ – mean value of the execution cycle of transit requests;

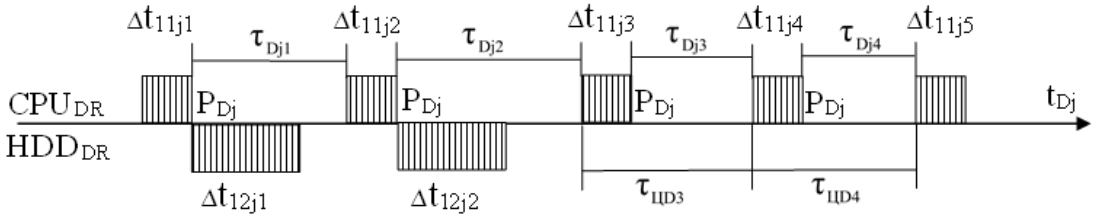
$\lambda_{2j} = 1/\bar{\tau}_{Tj}$ – intensity of incoming transactional requests from users in the DIS mode;

$p_{Tj} = \dfrac{n_{22j}}{n_{21j}}$ – probability of HDD_j use in the interaction cycle of the user's transactional request.

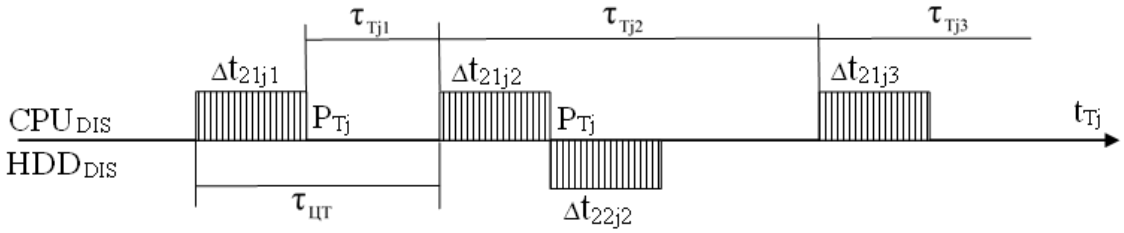
III. Creation of basic structures

The second part of the workload on the LAN node is the sequence of "bodies" TR_{Fj} . The formal description of the composition of the LAN node resources consists of the algorithms for the functioning of three processes simulating the use of LAN node resources.

a) DR mode



b) DIS mode



c) FON mode

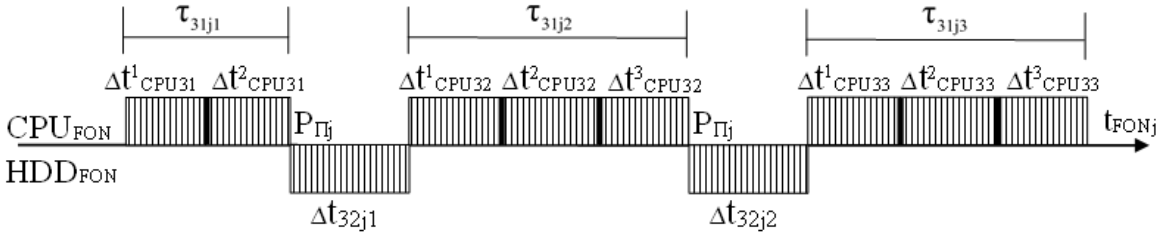


Fig.1. Time diagram of use invariants CPU*j* and HDD*j* of the *j*th LAN node in three modes of use of requests for LAN node resources (excluding interruptions of CPU and functioning of the LAN node operating system)

The first type of simulators employs the following function algorithm. Generators ($GEND_k$ and $GENT_k$) with intensities λ_{Dj} and λ_{ij} generate, respectively, the transactions TR_{Dj} and TR_{Tj}, recording the moments of appearance of transactions (t_{PDj} and t_{PTj}). Once servicing by CPU_j of the previous transaction with respect to probabilities P_{Dj} and P_{Tj} is completed, the transactions λ_{TRj} and TR_{Tj} return to the generators.

Upon completion of transaction servicing by the HDD_j device, the previous transactions return to the generators $GEND_k$ and $GENT_k$, where they are erased. At the moment of transaction erasure, the statistics of the transaction servicing interval by the LAN node is recorded, respectively ($t_{ExchCDjk}$ and $t_{ExchCTjk}$).

The second type of simulators employs the following CPU_j function algorithm. Transactions from the queues to CPU_j are processed according to the priority of such queues in the following sequence: TR_{Dj}, TR_{Tj} and TR_{Fj}. Once the transaction is selected from the queue to CPU_j, the transaction is serviced for Δt_{oc}. Upon expiration of this time interval, a check for presence of higher-priority transactions in the queues is performed.

If there are higher-priority transactions, PR_{Tj} returns to the beginning of the queue (QUE_1), and TR_{Fj} goes to the beginning of the queue (QUE_3). As for the external device CPU_j for probabilities PD_j, PT_j, PF_j, transactions TRD_j, TRT_j, TRF_j go to queues QUE_4, QUE_5, QUE_6, respectively, to the device HDD_j.

The third type of simulators has the following function algorithm of the process simulator HDD_j: transactions TRD_j, TRT_j and TRT_j are selected from the queues to HDD_j (according to the priorities of these queues). Once the transaction is selected from the queue to HDD_j simulation of transaction servicing for Δt_{oc} is performed. It shall be noted, that unlike with the simulator of CPU_j, transactions TK_j, TR_{Tj} and TR_P are serviced with no interruption of HDD_j. Once servicing of quantum number Δt_{oc} (n_{12} and n_{22}) on HDD_j is over, transactions TR_{Dj} and TR_{Tj} return respectively to $GEND_k$ and $GENT_k$.

At the moments of completion of servicing of TRF_j, the number of serviced "bodies" is modified ($\Omega sj = \Omega sj - 1$) and a check, whether the last element of task S has been serviced (the end of the task) or not, is performed. When the last quantum of CPU_j and HDD_j device use is executed, selection of the next task from the pack is initiated. In this case, the condition for ending the simulation of the entire task pack is checked [2].

IV. Conclusion

The result of the work is the formal description of the complex system, free from the secondary information (available in the informal description) and establishing the structure of the algorithmic representation of the modeling object.

It may turn out that the information available in the informal description is insufficient for formalizing the modeling object. In this case, it is necessary to return to the stage of compiling the informal description and supplement it with data, the need for which is discovered during the formalization of the modeling objects. In practice, there may be several such returns. [3]

The article shows examples of formalization of the computational process in a local area network node by using complex structure transactions, the "body" of which contains the information-colored structure of the workload.

References

[1] *Demidenko, O.M.,* Tools and technique of monitoring resource distribution for design simulation of organization of information processing, *Journal of automation, mobile robotics & intelligent systems,* Volume 3, № 4, 2009, pp. 118-120.

[2] *Demidenko, O.M., Kucherov A.I.,* Comparative analysis of mathematical methods to improve the reliability of the information and technical systems, *Scientific and technical journal «Problems of physics, mathematics and technics»,* Volume 22, № 1, 2015, pp. 92-97.

[3] *Khobnya, A.I., Liauchuk, V.D., Demidenko, O.M.* Conceptual model of mechanisms for ensuring quality of service in packet-switched networks // *Scientific journal «Informatics»,* №2, 2016, pp.78-87.

Геоинформационные системы нового поколения и криптовалюта оцифрованных пространств

А. Н. Мигачев
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
rotti001@yandex.ru

Аннотация. *В данной статье представлена концепция и реализация криптовалюты «Маппкоин», основанной на цифровых моделях географического пространства. Цель работы – стимулирование создания и поддержания высокоточных цифровых моделей реальных пространств, необходимых для эффективной и безопасной работы мультисредных автономных транспортных систем и эффективного использования природных и инфраструктурных ресурсов. Приведены основные аспекты проектирования данной криптовалюты, включая архитектуру блокчейна, систему пространственного деления территории, разработку смарт-контрактов, механизмы майнинга и системы управления временной деградацией ценности. Обсуждаются практические применения «Маппкоина», включая экономические стимулы и динамическое ценообразование токенов. В статье рассматриваются технические вызовы, такие как управление большими объемами данных и обеспечение их актуальности, а также предлагается дорожная карта реализации. В заключении сформулированы ключевые выводы и задачи для научного сообщества в области автономных транспортных систем.*

I. Введение

География Земли конечна, но с развитием информационных технологий становится исчисляемой. Криптовалюты и блокчейн могут трансформировать финансовые системы и создавать новые модели в цифровом пространстве [1-3]. Интеграция криптовалют с цифровыми моделями пространств необходима для эффективного управления территориями и поддержки автономных транспортных систем.

С увеличением плотности городской инфраструктуры и требованиями к безопасности, актуальность данных становится критически важной [4,5]. Идея интеграции блокчейн-технологий с географическими данными может стимулировать разработку и обновление картографических моделей.

Статья предлагает новый взгляд на использование криптовалют для управления цифровыми моделями пространства, акцентируя внимание на безопасности, актуальности и верификации данных. Ключевые аспекты включают архитектуру системы, методологии пространственного деления и механизмы сбора данных. Экономические стимулы обеспечиваются динамическим ценообразованием и управлением временной деградацией токенов.

Криптовалюта "Маппкоин" представляет собой инновационный подход к решению актуальных проблем, обеспечивая средства для оцифровки и управления территориальными данными.

II. Основная часть

Криптовалюта, обеспеченная цифровыми 3D-моделями географического пространства для мультисредных автономных систем, решает проблему оцифровки разнородных территорий. Один токен соответствует одному участку, например, 1 км², и его ценность зависит от детализации, актуальности, значимости территории и сложности моделирования. Майнинг осуществляется через сбор и валидацию данных, а механизм консенсуса включает автоматическую проверку качества моделей. Потребителями являются операторы автономных систем, картографические компании, владельцы инфраструктуры, госорганы и разработчики приложений. Основные плательщики – операторы автономного транспорта, вторичные – компании, заинтересованные в данных. Затраты включают начальные инвестиции в блокчейн-инфраструктуру, форматы данных и пилотные

территории, а также операционные расходы на поддержку инфраструктуры и сеть валидаторов. Потенциальные доходы формируются за счет транзакционных комиссий, процента от стоимости токенов и сервисов аналитики. Блокчейн обеспечивает децентрализованную валидацию через Proof of Quality, прозрачность данных и автоматические стимулы для обновления моделей [6]. Этапы развертывания включают 6-12 месяцев для работы с разработчиками и начальной сетью валидаторов, 12-18 месяцев для привлечения дополнительных разработчиков и тестировщиков, 18-36 месяцев для коммерческих компаний и независимых майнеров, а также 36+ месяцев для массового вовлечения специалистов. Задачи реализации охватывают выбор архитектуры блокчейна, создание системы пространственного деления с уникальной идентификацией участков, разработку смарт-контрактов для управления токенами, механизм майнинга с использованием дронов и спутников для сбора данных, а также управление деградацией ценности токенов через формулу (1) с дифференцированными ставками для различных территорий.

$$CurrentValue = InitialValue \times e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где:

λ – параметр, определяющий скорость обесценивания,

t – время с момента последнего обновления.

Технические аспекты реализации включают создание глобальной, постоянно обновляемой цифровой модели мира с использованием разнообразных источников данных, включая дроны, наземные роботы, лидарные системы и спутниковые снимки, предполагает децентрализованную архитектуру с элементами централизованного контроля и экономическими стимулами для обновления и валидации данных. Для сбора данных разрабатываются "легкие" сенсорные системы для массового использования. Обработка и хранение данных осуществляется с помощью ПО для автоматической фузии, компьютерного зрения и восстановления 3D-моделей, с использованием распределенного хранилища на основе IPFS, обеспечивающего шардинг и многоуровневый доступ. Модульные и масштабируемые форматы данных поддерживают разные уровни детализации и совместимость с ГИС. Трафик данных оптимизируется через компрессию, векторное представление и прогрессивную загрузку. Управление системой основано на гибридной модели: децентрализованный блокчейн и сеть валидаторов, дополненные элементами централизованного контроля со стороны госорганов и стандартов качества. Вознаграждения включают майнинг новых территорий, плату за использование данных и валидацию качества, а ценообразование токенов определяется формулой (2) учитывающей временную деградацию ценности токенов для стимулирования постоянного обновления данных.

$$TokenPrice = BaseValue \times QualityFactor \times DemandFactor \times TimeDecayFactor \quad (2)$$

где:

BaseValue – базовая стоимость, зависящая от типа территории,

QualityFactor – множитель качества данных (0.1 - 2.0),

DemandFactor – множитель спроса на данную территорию,

TimeDecayFactor – коэффициент временной деградации ценности.

Цифровой двойник и криптовалюта формируют самоорганизующуюся систему для безопасного мультисредного транспорта, где цифровой двойник обеспечивает безопасность, а криптовалюта стимулирует оцифровку территорий. Синергия воздушного, наземного и водного транспорта поддерживается общей платформой пространственных данных. Автономные системы требуют качественных цифровых моделей, а система с Proof of Quality гарантирует достоверность данных. Токенизация отражает рыночные различия в ценности территорий и оптимизирует затраты на обновление данных. 3D учет пространства с уникальными идентификаторами позволяет учитывать высоту и глубину, а криптовалюта способствует монетизации данных от автономного транспорта. Будущее включает новые профессии, такие как "пространственный майнинг", и поэтапное развертывание токенизации экономически выгодных участков [7-8]. Маппкоин предлагает

инновационный подход к созданию инфраструктуры для новой транспортной эры и управления цифровыми активами.

III. Заключение

Создание криптовалюты, обеспеченной цифровыми моделями пространства, представляет собой инновационный подход к организации движения автономных транспортных средств в разнородной среде. Эта система может стимулировать актуализацию цифровых моделей территорий, что критично для безопасного функционирования автономных транспортных систем и других инфраструктурных решений. В условиях России, с ее разнообразными регионами, такая криптовалюта может стать экономическим механизмом для развития высокотехнологичных геопространственных сервисов и создания рабочих мест. Временная деградация токенов отражает устаревание пространственных данных, создавая стимул для их обновления и повышения качества, что необходимо для безопасной работы автономных систем.

Литература

[1] *А.И.Пестунов.* Криптовалюты и блокчейн: потенциальные применения в государстве и бизнесе // *ЭКО. – 2018. – №8 (530). С.78-92.*

[2] *Р.В.Коняев, А.А.Перминова.* К вопросу о криптовалютной инфраструктуре в России // *Научные записки молодых исследователей. – 2025. – №1. – С. 91-100.*

[3] *С.Н.Гагарина, Н.Н.Чаусов, В.Н.Левкина.* Повышение эффективности городской транспортной инфраструктуры на основе цифровых технологий // *Вестник ГУУ. – 2020. – №7. – С.68-75.*

[4] *M.T.Rahman et al.* Examining Hotspots of Traffic Collisions and Their Spatial Relationships with Land Use: A GIS-Based Geographically Weighted Regression Approach for Dammam, Saudi Arabia *// ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2020. – Vol. 9. – P. 540.*

[5] *M.Zahi, et al.* Adopting Machine Learning and Spatial Analysis Techniques for Driver Risk Assessment: Insights from a Case Study *// Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17. – P. 5193.*

[6] *R.Sahal et al.* Blockchain-empowered digital twins collaboration: smart transportation use case // *Machines. – 2021. – Vol. 9. – No. 9. – P. 193.*

[7] *A.Batta et al.* Diffusion of blockchain in logistics and transportation industry: an analysis through the synthesis of academic and trade literature // *Journal of Science and Technology Policy Management. – 2021. – Vol. 12. – No. 3. – P. 378-398.*

[8] *P.Singh et al.* Blockchain and AI technology convergence: Applications in transportation systems // *Vehicular Communications. – 2022. – Vol. 38. – P. 100521.*

Экономическое обоснование эффективности использования нейронных сетей для автоматического определения и исправления ошибок в программном коде

Э. В. Синяева, А. В. Боднар
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия,
elli200314@gmail.com, linabykova13@ya.ru

Аннотация: *В статье рассматриваются экономические аспекты внедрения нейронных сетей для автоматического обнаружения и исправления ошибок в программном коде. Проведен анализ затрат и выгод, включая сокращение времени разработки, уменьшение количества ошибок и повышение качества ПО. Показано, что использование нейронных сетей позволяет снизить финансовые издержки компаний на тестирование и поддержку программных продуктов.*

I. Введение

Современная разработка программного обеспечения (ПО) сталкивается с рядом вызовов, связанных с увеличением сложности кода, ростом требований к качеству и необходимостью ускорения вывода продуктов на рынок [1]. Одним из наиболее трудоемких и затратных этапов жизненного цикла ПО является тестирование и отладка, на которые может приходиться до 40% общего времени разработки.

Традиционные методы поиска и исправления ошибок, такие как ручное тестирование и статический анализ, требуют значительных человеческих ресурсов и не всегда обеспечивают высокую точность обнаружения дефектов [2]. В последние годы машинное обучение, в частности нейронные сети, активно внедряется в различные области программирования, включая автоматизацию тестирования и отладки.

Цель статьи – продемонстрировать, что внедрение нейронных сетей для автоматической отладки не только улучшает качество ПО, но и обеспечивает значительную экономическую выгоду, оправдывая первоначальные инвестиции в их разработку и обучение.

II. Традиционные методы отладки

Ручная отладка остается одним из наиболее распространенных, но трудоемких методов поиска ошибок. Разработчики тратят значительное время на пошаговое выполнение кода, анализ логов и проверку корректности работы функций. По данным исследований, на ручное тестирование может уходить 20–40% времени разработки, а стоимость исправления одной ошибки на поздних этапах достигает 5.000–5.000–10.000. Основные недостатки метода — высокая зависимость от квалификации тестировщика, субъективность оценки и невозможность масштабирования на большие проекты.

Инструменты статического анализа (например, SonarQube, ESLint) автоматически проверяют код на соответствие стандартам и потенциальные уязвимости. Они эффективны для обнаружения синтаксических ошибок и простых багов, но часто пропускают сложные логические дефекты. Кроме того, такие системы требуют тонкой настройки правил и генерируют множество ложных срабатываний, что увеличивает нагрузку на разработчиков.

Фреймворки для автоматического тестирования (Selenium, JUnit, pytest) позволяют ускорить проверку функционала, но их внедрение сопряжено с высокими начальными затратами. Необходимо:

- Писать и поддерживать тестовые сценарии.
- Организовывать инфраструктуру (CI/CD, виртуальные среды).
- Проводить регрессионное тестирование после каждого изменения.

Для сложных систем покрытие тестами редко превышает 70–80%, что оставляет риски незамеченных ошибок.

III. Нейросетевые модели для автоматической отладки

Нейросетевые модели для автоматической отладки представляют собой революционный подход в области обеспечения качества программного обеспечения. В отличие от традиционных методов, которые требуют явного описания правил и шаблонов для поиска ошибок, нейронные сети способны обучаться на больших объемах кода, выявляя сложные паттерны и аномалии. Это позволяет обнаруживать не только синтаксические ошибки, но и логические несоответствия, которые часто ускользают от статических анализаторов и даже опытных разработчиков. Современные модели достигают точности обнаружения ошибок в 85-90% случаев, что подтверждается независимыми исследованиями крупных IT-компаний.

Ключевым преимуществом нейросетевых моделей является их способность к контекстному анализу кода [3]. Они рассматривают программу не как набор отдельных строк, а как связанную структуру, учитывая зависимости между функциями, классами и модулями. Например, система DeepDebug от Google анализирует не только конкретную строку с потенциальной ошибкой, но и весь окружающий контекст, что значительно повышает точность диагностики. Перспективы развития, включая методы XAI, соответствуют трендам, описанным в работах по машинному обучению для больших кодовых баз. Особенно эффективны такие модели для языков с динамической типизацией, таких как Python или JavaScript, где многие ошибки проявляются только во время выполнения.

Генеративные модели, такие как последовательностные архитектуры Seq2Seq, открывают новые возможности для автоматического исправления ошибок. Эти системы могут не только обнаруживать проблемы, но и предлагать конкретные патчи для их устранения. Эксперименты Microsoft показали, что нейросетевые подходы сокращают время на отладку на 30-50%, особенно при работе с языками типа Python и JavaScript. В некоторых случаях нейросети генерируют несколько вариантов исправлений, ранжируя их по вероятности корректности. Практические реализации, такие как GitHub Copilot, уже сегодня помогают разработчикам, предлагая решения в реальном времени прямо в среде разработки. Это сокращает время на отладку на 30-50%, что особенно ценно в условиях agile-разработки.

Однако внедрение нейросетевых моделей в процесс отладки сталкивается с рядом вызовов. Одной из основных проблем является необходимость обучения на релевантных данных - модели, тренированные на открытых репозиториях, могут плохо работать с узкоспециализированными доменами. Кроме того, объяснимость решений, предлагаемых нейросетями, остается сложной задачей, что ограничивает их применение в критически важных системах. Тем не менее, постоянное совершенствование архитектур и методов обучения позволяет преодолевать эти ограничения, делая нейросетевые подходы все более привлекательными для автоматизации процессов тестирования и отладки.

IV. Экономико-алгоритмическое моделирование эффективности внедрения нейросетей в процесс отладки

Анализ эффективности использования нейросетевых архитектур в процессе отладки программного обеспечения может быть реализован на основе гибридной методологии, объединяющей принципы стоимостного моделирования жизненного цикла ПО (Cost-based Software Lifecycle Modeling), методологию функционально-стоимостного анализа (FCA) и элементы модели COCOMO II, адаптированные под интеллектуальные системы [4]. В качестве нормативной базы используются положения международного стандарта ISO/IEC 9126 и его продолжений (ISO/IEC 25010), в которых рассматриваются такие параметры качества, как надёжность, сопровождаемость, устойчивость и экономическая эффективность [5].

Построенная модель основывается на предположении, что процессы отладки и устранения ошибок занимают значительную долю в общем бюджете разработки ПО — от 30 до 50% всех человеко-часов, в зависимости от сложности проекта и зрелости команды. Традиционно эти процессы включают ручную верификацию кода, использование статических и динамических анализаторов, написание тестов, проведение ревью и регрессионных прогонов. Однако даже при

наличии современных CI/CD-практик остаются нерешёнными проблемы, связанные с высокой стоимостью позднего обнаружения ошибок, ограничениями масштабирования и зависимостью от человеческого фактора.

Модельная оценка внедрения нейросетевых средств включает переменные, отражающие не только прямые затраты (оплата труда, лицензии, инфраструктура), но и косвенные издержки, связанные с повторной разработкой, снижением доверия к продукту, нарушением сроков релиза и необходимостью срочной поддержки. Как демонстрируют исследования Google, интеграция DeepDebug в CI/CD-пайплайны уменьшает количество критических багов в production на 60%. Основное внимание уделяется показателю ROI (Return on Investment), который в случае использования моделей типа CodeBERT, DeepFix, GraphCodeBERT и GPT-Code достигает положительных значений уже на горизонте одного полного цикла разработки (обычно 4–8 месяцев). Это достигается благодаря сокращению среднего времени на диагностику ошибки, снижению доли критических багов в релизе и уменьшению затрат на пострелизную поддержку.

Кроме того, модель учитывает факторы обучаемости и повторного использования нейросетевого решения. Один раз натренированная модель, адаптированная к специфике кода предприятия, может быть повторно интегрирована в десятки будущих проектов без существенных затрат, что создаёт эффект накопленной стоимости. В сценарии масштабируемой архитектуры с централизованным управлением обучением (например, MLOps-платформа), эффективность таких моделей возрастает экспоненциально, особенно в распределённых командах с высокой степенью технического долга.

Особое внимание в расширенной модели уделяется компоненту "экономики качества" оценки соотношения между затратами на предотвращение дефектов и потенциальным ущербом от их появления в продакшене. В этом контексте нейросетевые модели выступают не только как инструмент экономии, но и как системный механизм снижения операционных рисков. Их применение позволяет перейти от реактивного подхода к проактивному, где ошибки устраняются на стадии ввода или написания кода, а не в процессе эксплуатации.

Таким образом, представленное экономико-алгоритмическое моделирование позволяет не только обосновать целесообразность внедрения интеллектуальных средств автоматической отладки, но и формализовать их вклад в общую стратегию цифровой трансформации программных предприятий. Систематизация данных в рамках этой модели может быть использована для принятия управленческих решений, планирования бюджета и выстраивания внутренней политики качества разработки.

Рассматриваемая модель предполагает два альтернативных сценария: $\mathbf{S_0}$, основанный на использовании традиционного инструментария (ручное тестирование, статический анализ, unit-тесты), и $\mathbf{S_1}$, предполагающий интеграцию нейросетевого агента, способного к семантическому анализу и генеративной реконструкции дефектных фрагментов кода. Математически разность между сценариями можно выразить через параметр ΔE, характеризующий разницу в совокупных приведённых издержках:

$$\Delta E = E(S^0) - E(S^1) \quad (1)$$

где E(S) — ожидаемая приведённая стоимость (Expected Normalized Cost) соответствующего сценария.

При допущении о разработке ПО средней сложности (с оценкой объёма в 100 KLOC), команда из $N = 10$ специалистов, ставка $C_h = 150\,000$ руб./мес., продолжительность $\tau = 6$ мес., доля времени на отладку в S_0 составляет в среднем $T_0 = 0.4$. Следовательно, затраты по S_0:

$$E(S_0) \approx C_h \times N \times T_0 \times \tau + P \quad (2)$$

где P — оценка стоимости дефектов, проявившихся post-release (в среднем 15–20% дополнительных издержек, в зависимости от уровня зрелости команды и сложности архитектуры).

В сценарии S_1, где применяется нейросетевая модель (например, Codex или CodeBERT), введены параметры:

- β — коэффициент сокращения трудоёмкости за счёт автоматизации (0.35–0.5),
- L — расходы на интеграцию модели и адаптацию пайплайнов CI/CD (около 600–800 тыс. руб.),
- R — уменьшенные издержки на поддержку (около 10% от бюджета на отладку).

Таким образом,

$$\mathrm{E}(S_1) \approx C_h \times N \times T_0 \times (1-\beta) \times \tau + \mathrm{L} + \mathrm{R} \quad (3)$$

Подставляя значения:

$$\mathrm{E}(S_0) \approx 150{,}000 \times 10 \times 0.4 \times 6 + 720{,}000 = 4{,}320{,}000 \text{ руб.} \quad (4)$$

$$\mathrm{E}(S_1) \approx 150{,}000 \times 10 \times 0.4 \times 6 \times 0.6 + 600{,}000 + 216{,}000 = 2{,}976{,}000 \text{ руб.} \quad (5)$$

$\Delta\mathrm{E} = 1{,}344{,}000$ руб., что при повторном применении нейросетевого инструмента на последующих проектах приводит к накопленному эффекту масштаба.

При анализе чувствительности модели видно, что даже при колебаниях параметров β и L в пределах 10% интеграция остаётся рентабельной. Более того, при использовании моделей с трансферным обучением и fine-tuning на доменной выборке, эффективность может быть дополнительно увеличена без пропорционального роста затрат.

V. Перспективы развития и заключение

Развитие технологий автоматического поиска и исправления ошибок в программном коде с применением нейросетевых архитектур открывает новые горизонты в сфере обеспечения качества программного обеспечения. На сегодняшний день существующие модели, такие как CodeBERT, Codex и их производные, демонстрируют высокий уровень точности и генеративной способности. Однако в ближайшей перспективе можно ожидать значительное углубление специализации этих моделей за счёт доменно-ориентированного обучения и инкрементального обновления на актуальных проектных данных, что существенно повысит их релевантность и адаптивность в конкретных предметных областях.

Существенным направлением развития станет повышение интерпретируемости нейросетевых решений. В настоящее время одно из ключевых ограничений широкомасштабного внедрения таких моделей заключается в их «чёрном ящике» — неспособности объяснить, почему и как была сделана та или иная правка. Введение методов XAI (Explainable Artificial Intelligence) в контексте генерации кода позволит преодолеть барьер доверия между машинной и человеческой логикой и обеспечит интеграцию ИИ в процессы критически важной разработки, например, в сферах авиации, медицины или финтеха.

Также ожидается трансформация архитектур ИИ-инструментов в сторону интеграции с корпоративными DevOps-платформами. Совмещение возможностей автоматического исправления ошибок с непрерывной интеграцией (CI) и непрерывной доставкой (CD) кода позволит выстроить полнофункциональные пайплайны, в которых дефекты устраняются ещё до их попадания в staging- или production-среду. Такая трансформация повлечёт за собой перераспределение функций внутри команд, где роль разработчика будет смещаться в сторону контроля, архитектурного проектирования и адаптации предложений ИИ.

С точки зрения экономической целесообразности, нейросетевые решения уже сегодня демонстрируют положительное сальдо при реализации в рамках проектов среднего масштаба. По мере накопления репозиториев обучающих данных и снижения барьеров по вычислительным мощностям (например, с переходом на edge-вычисления или дифференцированную загрузку моделей), стоимость внедрения будет снижаться, а выгода — возрастать. Это делает нейросети не только технологическим новшеством, но и экономическим драйвером, позволяющим оптимизировать процессы жизненного цикла программных продуктов.

Таким образом, автоматизация отладки с использованием нейронных сетей выходит за рамки экспериментального этапа и становится логическим этапом эволюции инженерии программного обеспечения. Перспективы дальнейшего роста заключаются не столько в увеличении точности распознавания ошибок, сколько в трансформации всего парадигмального подхода к разработке, при

котором код становится объектом совместной деятельности человека и интеллектуальной системы. Такое слияние обещает не только ускорение процессов, но и повышение качества, надёжности и адаптивности цифровых продуктов в условиях быстро меняющегося технологического ландшафта.

Литература

[1] *Сазонов А.П.* Использование ИИ в программировании. — Universum: технические науки. — 2024. — №3(120).

[2] *Бахтизин А.Р., Бахтизина М.А.* Модели и методы экономики программирования: учебное пособие. — М.: Финансы и статистика, 2021. — 160 с.

[3] *Белов П.А.* Интеллектуальные системы в программной инженерии. — СПб.: Питер, 2018. — 288 с.

[4] *Конратюк М.М., Курганович Н.А., Ковалевич А.Д.* Перспективы использования нейросетей в программировании. — Материалы 60-й научной конференции БГУИР. — Минск, 2024. — С. 15–18.

[5] ISO/IEC 9126-1:2001. Software engineering — Product quality — Part 1: Quality model.

Применение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ после СВО

О. В. Кудрявцева[1,2], М. А. Кудрявцева[2]
[1]Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,
[2]Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Астрахань, Россия,
kudryavtzevaov@mail.ru

***Аннотация**. В современном мире трудоустройство лиц с ограниченными возможностями здоровья, особенно после участия в специальной военной операции, является особо важным. Применение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ открывает новые возможности для преодоления барьеров, расширения доступа к рабочим местам и повышения эффективности процесса трудоустройства.*

I. Введение

В настоящее время лица с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) испытывают трудности в конкуренции на рынке труда из-за необходимости в адаптированных рабочих местах. В России принята Концепция по повышению уровня занятости инвалидов до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 02.09.2024 N 2401-р). Согласно Концепции [1], инвалид – это человек с нарушением здоровья, характеризующимся стойким расстройством функций организма, вызванным заболеваниями, травмами или дефектами, приводящим к ограничению жизнедеятельности и требующим социальной защиты. Лицо, имеющее инвалидность вследствие военной травмы, т.е. в результате ранения, контузии, увечья или заболевания, полученных при защите Отечества.

Трудоустройство инвалида относится к комплексу мероприятий по обеспечению права инвалида на труд, включающий профессиональную подготовку, создание доступных рабочих мест и поддержку в процессе трудоустройства.

Сопровождение при содействии занятости инвалидов, получивших травмы в ходе специальной военной операции, включает в себя индивидуальную помощь в:

- поиске работы и оформлении на работу;
- создании адаптированных условий труда;
- ускорении профессиональной адаптации;
- разработке оптимальных маршрутов передвижения до работы и обратно, а также внутри предприятия.

В современном мире трудоустройство лиц с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ), особенно после участия в специальной военной операции (СВО), – это многогранная задача, требующая особого внимания и комплексного подхода. Необходимо учитывать не только физические и психологические травмы, но и адаптировать существующие механизмы трудоустройства к их уникальным потребностям [2].

Ключевые аспекты успешного трудоустройства:

- индивидуальный подход: оценка профессиональных навыков, потребностей в реабилитации и психологической поддержке для каждого ветерана с ОВЗ (разработка индивидуального плана трудоустройства);
- доступность и адаптация: обеспечение физической доступности рабочих мест, адаптация оборудования и программного обеспечения под нужды конкретного сотрудника;

- профессиональная переподготовка и повышение квалификации: предоставление доступа к программам, учитывающим как предыдущий опыт, так и полученные травмы. Акцент на востребованные на рынке труда специальности;
- психологическая поддержка: обеспечение доступа к квалифицированной психологической помощи для преодоления травм и адаптации к гражданской жизни, поддержка семьи;
- взаимодействие с работодателями: информирование о преимуществах трудоустройства лиц с ОВЗ, предоставление стимулов для создания адаптированных рабочих мест, сопровождение и поддержка на рабочем месте;
- правовая защита: обеспечение соблюдения трудовых прав, защита от дискриминации и предоставление бесплатной юридической помощи.

Необходимы конкретные шаги:

- создание специализированных центров занятости, ориентированных на лиц с ОВЗ, особенно ветеранов СВО, предоставляющих комплексную поддержку [3];
- разработка программ переквалификации и реабилитации, адаптированных к потребностям ветеранов с учетом их ограничений и потенциала;
- стимулирование работодателей с помощью предоставление налоговых льгот, субсидий на создание адаптированных рабочих мест и компенсацию затрат на обучение;
- развитие дистанционной занятости, создание возможностей для работы из дома, что особенно актуально для лиц с ограниченной мобильностью;
- использование современных технологий, применение специализированного программного обеспечения, устройств для управления голосом и других средств адаптации рабочего места [4];
- активное вовлечение общественных организаций для представления интересов лиц с ОВЗ и обеспечения учета их потребностей.

Применение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ открывает новые возможности для преодоления барьеров, расширения доступа к рабочим местам и повышения эффективности процесса трудоустройства.

Ключевые направления и примеры использования цифровых технологий представлены на рисунке 1.

Рисунок 1. Направления и примеры использования цифровых технологий

К основным преимуществам цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ относятся:

- расширение доступа, т.е. преодоление географических и физических барьеров, расширение доступа к информации, обучению и рабочим местам;
- индивидуализация, т.е. возможность адаптации технологий и программ под нужды конкретного человека с ОВЗ;
- гибкость и удобство, т.е. предоставление возможности работать удаленно, учиться в удобное время и получать поддержку в режиме онлайн;
- повышение эффективности, т.е. автоматизация рутинных задач, улучшение коммуникации и повышение производительности труда [5];
- снижение затрат, т.е. сокращение расходов на транспорт, аренду офиса и другие операционные расходы.

Таким образом, успешное трудоустройство лиц с ОВЗ после СВО – это не только моральный долг общества, но и вклад в развитие страны. Интеграция этих людей в рынок труда позволяет им реализовать свой потенциал, повысить уровень жизни и внести свой вклад в экономику. Важно создать условия, при которых они почувствуют себя востребованными и смогут вернуться к полноценной жизни. Применение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ требует комплексного подхода, включающего разработку доступных платформ и приложений, обучение специалистов по адаптации технологий и обеспечение доступа к необходимому оборудованию и программному обеспечению. Важно также учитывать этические вопросы, связанные с использованием данных и обеспечением конфиденциальности. Правильное и грамотное применение цифровых технологий может значительно улучшить возможности трудоустройства для лиц с ОВЗ, создать более инклюзивное и справедливое общество.

Литература

[1] Распоряжение Правительства РФ от 02.09.2024 N 2401-р <Об утверждении Концепции по повышению уровня занятости инвалидов в Российской Федерации на период до 2030 года, плана мероприятий по ее реализации> http://pravo.gov.ru, 04.09.2024

[2]. *Кураева, Л. Н.* Российская практика реализации прав инвалидов на труд и занятость / Л. Н. Кураева, Ф. И. Мирзабалаева // *Экономика труда*. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 843-858. – DOI 10.18334/et.10.6.117865

[3] Оценка и основные подходы к содействию занятости инвалидов на российском рынке труда / *Ф. И. Мирзабалаева, С. Е. Пашкова, Г. В. Антонова, А. В. Анфалова* // *Экономика труда*. – 2024. – Т. 11, № 11. – С. 1911-1928. – DOI 10.18334/et.11.11.121937

[4]. *О.В. Кудрявцева, М.А. Кудрявцева.* Влияние цифровизации экономики на рынок труда в современной России //*Материалы VIII Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2024)*. (1-5 октября 2024 г., Владикавказ, Россия) 2024. С. 222-225

[5]. *Кудрявцева, О. В.* Роль цифровых технологий в экономической деятельности / *О. В. Кудрявцева, К. А. Карамулдаева* // Технические средства систем управления и связи = International Scientific Forum on Control and Engineering: *Материалы Международного научного форума. Материалы VI Международной конференции. Материалы 15-й Международной конференции*, Астрахань, 03–07 октября 2022 года. – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2022. – С. 329-331. – EDN SBRLPJ

Трудоустройство лиц с ОВЗ – актуальная задача в условиях развития цифровой экономики

О. В. Кудрявцева[1,2], М. А. Кудрявцева[2]
[1]Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,
[2]Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Астрахань, Россия,
kudryavtzevaov@mail.ru

***Аннотация**. В статье подробно изучены трудности, с которыми сталкиваются люди с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) при поиске работы, а также рассмотрен опыт других стран в решении этой проблемы. Особое внимание уделено тому, как цифровые технологии могут помочь инвалидам в трудоустройстве. В заключение предложены основные направления для успешной интеграции инвалидов в трудовую сферу, с акцентом создание доступных технологий и рабочих мест, учитывающих потребности различных групп людей с ОВЗ.*

I. Введение

В современных условиях интеграция лиц с ОВЗ в сферу занятости становится все более актуальной. Однако, их трудоустройство в быстро развивающейся цифровой экономике представляет собой сложную задачу, требующую глубокого анализа и применения инновационных подходов [1].

К основным проблемам, с которыми сталкиваются лица с ОВС в условиях развития цифровой экономики относятся:

1. Навыки и компетенции:

- цифровой разрыв, т.е. люди с ОВЗ часто не могут освоить цифровые технологии из-за ограниченного доступа к образованию, специализированным программам и ассистивным инструментам;
- многие обладают навыками, не актуальными для цифровой экономики, что требует переподготовки;
- постоянное развитие технологий требует от людей с ОВЗ непрерывного обучения, что может быть затруднительно.

2. Доступность и адаптация:

- цифровые платформы и инструменты часто не адаптированы для разных видов инвалидности;
- рабочие места с использованием цифровых технологий часто не приспособлены для людей с ОВЗ, что требует дополнительных затрат на адаптацию;
- не хватает доступных (в том числе по цене) специализированных ассистивных технологий.

3. Дискриминация и предрассудки:

- работодатели часто недооценивают потенциал людей с ОВЗ в цифровой среде из-за предвзятого отношения;
- работодатели недостаточно информированы о возможностях трудоустройства людей с ОВЗ с использованием цифровых технологий и преимуществах найма таких сотрудников;
- из-за дискриминации и отсутствия возможностей развития, карьерный рост в цифровой экономике для людей с ОВЗ затруднен.

4. Поддержка и интеграция:

-недостаток программ поддержки, т.е. не хватает программ обучения, стажировок и наставничества для трудоустройства людей с ОВЗ в цифровой экономике;

-отсутствие координации, т.е. слабая координация между государственными органами, организациями, работающими с людьми с ОВЗ, и работодателями;

- люди с ОВЗ часто испытывают социальную изоляцию, что негативно влияет на их трудоустройство и карьеру.

5. Специфические проблемы различных групп:

-нарушения зрения, т.е. необходимы специальные программы для чтения с экрана, синтезаторы речи и другие ассистивные технологии;

-при нарушение слуха требуется перевод на язык жестов, субтитры и другие средства коммуникации.

-при нарушении опорно-двигательного аппарата нужны адаптированные рабочие места, ассистивные устройства и программное обеспечение;

-при интеллектуальных нарушениях необходимы упрощенные инструкции, поддержка и наставничество на рабочем месте;

-ментальные расстройства требует гибкий график работы, поддержку психического здоровья и понимающее отношение работодателя.

Многие страны законодательно запрещают дискриминацию инвалидов в сфере трудоустройства и реализуют стратегии поддержки занятости, такие как интеграция вопросов занятости в госпрограммы (Швеция) и специальные меры для преодоления барьеров (программа "Билет на работу" в США, законы в Испании и Финляндии о сохранении пособий). В Азиатско-Тихоокеанском регионе действует Инчхонская стратегия, направленная на обеспечение прав инвалидов. Китай уделяет внимание соблюдению прав и активному участию инвалидов в обществе, растет число работодателей, принимающих на работу лиц с ОВЗ, а вопросы образования включены в программу "Модернизация образования Китая до 2035 года". В Японии трудоустройство лиц с ОВЗ регулируется принципами "расширения" возможностей и "долгосрочной" занятости, включая антидискриминационное законодательство и систему квотирования. Республика Корея, основываясь на Конвенции ООН, активно поддерживает интеграцию людей с инвалидностью, уделяя особое внимание женщинам и запрещая дискриминацию в сфере трудоустройства [2].

В международной практике широко применяется "поддерживаемое трудоустройство", требующее длительной поддержки и гибкого сотрудничества между различными организациями для помощи инвалидам с тяжелыми заболеваниями.

В России, в соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 02.09.2024 N 2401-р, инвалидность определяется как нарушение здоровья, приводящее к ограничению жизнедеятельности и требующее социальной защиты [3]. Для обеспечения права на труд инвалидов реализуются меры по профподготовке, созданию доступных рабочих мест и поддержке. Однако система поддержки занятости инвалидов в РФ нуждается в совершенствовании, так как работодатели часто не выполняют квоты, предлагаемые рабочие места не соответствуют квалификации и возможностям инвалидов, а стимулы для работодателей недостаточно эффективны. Одной из наиболее острых современных проблем является интеграция лиц с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) в сферу труда и предоставление им возможности для самореализации через организацию собственного бизнеса. Зачастую лица с ОВЗ относятся к социально незащищенным слоям населения из-за невозможности реализовать свое право на труд. Поиск и получение работы для них крайне затруднены, а количество желающих трудоустроиться значительно превышает количество доступных вакансий. На ситуацию влияют государственные законодательные инициативы, в частности, квотирование рабочих мест [4].

Для выполнения квот на трудоустройство инвалидов работодатели используют разные способы, включая прямой наем и субподряд специализированным предприятиям. В ряде европейских стран, например, в Италии, Франции, Германии и Испании, компании обязаны обеспечивать трудоустройство инвалидов в рамках квот, за несоблюдение которых предусмотрены санкции [5]. В Европе применяются три модели квотирования: необязательные, обязательные без штрафов и обязательные со штрафами.

В большинстве стран наблюдается прогресс в интеграции людей с инвалидностью в трудовое пространство, благодаря реализации положений Конвенции о правах инвалидов и принятию антидискриминационных законов и законов о квотах. Укрепляются национальные механизмы продвижения и защиты прав инвалидов.

Анализ зарубежных практик показывает, что основной целью программ поддержки является создание комплексного стимулирующего механизма для работодателей, включающего субсидии, компенсации расходов на обучение, скидки по взносам и предоставление кредитов/грантов.

Применение зарубежных технологий в отечественной практике позволит сделать услуги по трудоустройству, адаптации и обучению инвалидов более "проактивными".

Для полноценной интеграции людей с инвалидностью в трудовую сферу ключевую роль играет их участие в цифровой экономике. Цифровизация открывает широкие возможности, включая создание технологически поддерживаемой рабочей среды с использованием вспомогательных технологий и гибких рабочих мест для удаленной работы. Более того, цифровые технологии могут применяться для создания новых рабочих мест, а инструменты на основе искусственного интеллекта – для уменьшения предвзятости при приеме на работу. Важно, что цифровые технологии расширяют доступ к образованию, предоставляя возможности для онлайн- и дистанционного обучения [6].

Таким образом, решение проблемы трудоустройства людей с ОВЗ в цифровой экономике требует комплексного подхода, включающего следующие направления:

-инклюзивное образование и профессиональная подготовка, т.е. обеспечение доступного и качественного образования, ориентированного на требования цифровой экономики;

-адаптация цифровых технологий и рабочих мест, т.е. создание доступных технологий и рабочих мест, учитывающих потребности различных групп людей с ОВЗ, а также расширение возможностей удаленной работы;

-борьба с дискриминацией и продвижение инклюзивности, т.е. повышение осведомленности работодателей и общества о преимуществах найма людей с ОВЗ, принятие антидискриминационных законов и программ поддержки;

-развитие программ поддержки и интеграции, т.е. создание специализированных программ обучения, стажировок и наставничества;

-развитие цифровых и ассистивных технологий, т.е. активное развитие технологий искусственного интеллекта, машинного обучения, роботизации, а также улучшение доступности информации и коммуникаций через интернет и цифровые платформы.

Литература

[1]. *Кураева, Л. Н.* Российская практика реализации прав инвалидов на труд и занятость / *Л. Н. Кураева, Ф. И. Мирзабалаева* // *Экономика труда*. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 843-858. – DOI 10.18334/et.10.6.117865

[2]. *Савощикова, Е. В.* Лица с ОВЗ и инвалиды - опыт правового регулирования по вопросам трудоустройства и организации бизнеса в зарубежных странах / *Е. В. Савощикова, Л. Р. Гардашханова* // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков : *сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции*, Москва, 30 ноября 2022 года. – Москва: Алеф, 2022. – С. 190-196. – DOI 10.34755/IROK.2022.36.43.019. – EDN BJUOUQ.

[3]. Распоряжение Правительства РФ от 02.09.2024 N 2401-р <Об утверждении Концепции по повышению уровня занятости инвалидов в Российской Федерации на период до 2030 года, плана мероприятий по ее реализации> http://pravo.gov.ru

[4]. Оценка и основные подходы к содействию занятости инвалидов на российском рынке труда / *Ф. И. Мирзабалаева, С. Е. Пашкова, Г. В. Антонова, А. В. Анфалова* // *Экономика труда*. – 2024. – Т. 11, № 11. – С. 1911-1928. – DOI 10.18334/et.11.11.121937

[5]. *Мирзабалаева, Ф. И.* Зарубежный опыт государственного регулирования и интеграции инвалидов в сферу занятости / *Ф. И. Мирзабалаева, С. Е. Пашкова* // *Экономика труда*. – 2024. – Т. 11, № 10. – С. 1691-1712. – DOI 10.18334/et.11.10.121892

[6]. О.В. Кудрявцева, М.А. Кудрявцева. Драйверы внедрения цифровых технологий в управление кадровым обеспечением региона //Материалы VIII Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2024). (1-5 октября 2024 г., Владикавказ, Россия) 2024. С..120-123

Применение принципа управления по прогнозу регулируемой величины в линейных системах автоматического регулирования

Г. А. Пикина[1], Д. М. Суслов[1], Ф. Ф. Пащенко[2]

[1]Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,

[2]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,

pikinaga@mail.ru, daniil.suslov.m@gmail.com, pif-70@yandex.ru

***Аннотация**. Вместо стандартного принципа управления по текущему состоянию регулируемой величины предлагается перейти к принципу прогностического управления по её значению в будущем. Показано, что реализация этого принципа в системах автоматического регулирования технологических процессов со стандартными алгоритмами (П, ПИ, ПИД) позволяет существенно повысить качество регулирования и одновременно полнее использовать возможности, предоставляемые программируемой микропроцессорной техникой. Приведенные в статье примеры подтверждают, что прогноз позволяет уменьшить диапазон отклонения регулируемой величины в одноконтурных системах в два, а в двухконтурных — в три раза. Потенциальные возможности предиктивных алгоритмов могут быть использованы при настройке регуляторов на реальном действующем объекте в случаях, когда его динамические характеристики неизвестны. Предложен метод настройки прогностических линейных регуляторов по одному параметру — времени прогноза. Возможности такого управления показаны при моделировании различных регулируемых каналов энергетических котлов средней мощности.*

I. Введение

Впервые идеология прогнозирования (predictive control) была описана в работе О. Смита [1] при управлении объектом в виде звена чистого запаздывания с передаточной функцией $W(p)=e^{-p\tau_0}$, где τ_0 – запаздывание.

Однако ограниченность его действия связана с неориентированностью на оптимальное управление при множественных входных воздействиях от различных факторов. Концепция его работы заключается в прогнозировании управляющего воздействия, при этом компенсация предполагается только на величину запаздывания.

В свою очередь альтернативный вариант, предполагающий прогнозирование регулируемой величины, позволяет не только учесть чистое запаздывание, но емкостное (инерционность объекта). Ведь именно оно наиболее важно, например, для энергоблоков, так как все автоматические системы регулирования (АСР) в качестве управляющего воздействия используют изменение расходов. Благодаря чему, процессы происходят со скоростью звука, а величина чистого запаздывания на несколько порядков ниже суммарной постоянной времени объекта.

II. Прогностический регулятор в одноконтурной АСР

Структура прогностического регулятора (рис.1) состоит из двух составляющих: регулятора с ПИД законом регулирования и элемента прогнозирования [2].

С помощью прогнозатора преобразуется сигнал $y(t)$ в $\varepsilon_{пр}(t)$. В случае простейшего линейного прогноза $\varepsilon_{пр}(t)$ вычисляем по формуле $\varepsilon_{пр}(t)=y(t)+[y(t)+y'(t)]\cdot\tau_{пр}$, ему соответствует передаточная функция $W_{пр}(s)=(\tau_{пр}\cdot s+1)$, где $\tau_{пр}$ – время прогнозирования. Более сложные алгоритмы прогнозирования дают сравнительное небольшое повышение точности, а поэтому их применение целесообразно только в исключительных случаях. Передаточная функция

прогностического регулятора, например, для ПИ с коэффициентом усиления (Kp) и временем интегрирования (Tu), становится равной (1):

$$W_p(p) = Kp \cdot \left(1 + \frac{\tau_{np}}{Tu}\right) + \frac{Kp}{Tu \cdot p} + Kp \cdot \tau_{np} \cdot p \qquad (1)$$

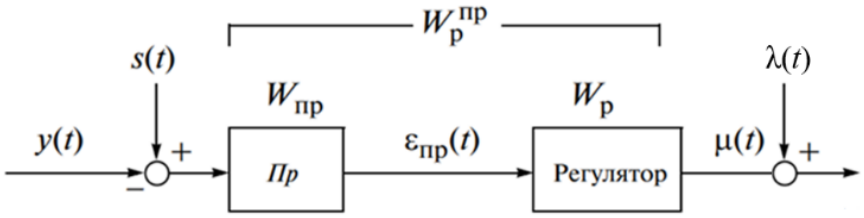


Рис. *1.* Прогностический регулятор: Wпр – передаточная функция прогностического ПИД регулятора с линейным прогнозом;
Wр – передаточная функция ПИД регулятора; Wпр – передаточная функция элемента прогнозирования;
Пр – прогностический элемент; εпр(t) – ошибка регулирования;
μ(t) – упреждающее воздействие; s(t) – заданное значение регулируемой величины;
y(t) – текущее значение регулируемой величины,
λ(t) – возмущение, приведенное ко входу в объект.

При этом, принцип управления по прогнозу применим не только для цифровых регуляторов. В случае если используется аналоговый регулятор, то параллельно сигналу регулирования подается сигнал от реального дифференциатора с передаточной функцией $W_{рд}(p) = \frac{K_{рд} \cdot T_{рд} \cdot p}{T_{рд} \cdot p + 1}$. Для его приближения к линейному прогнозу, необходимо максимально уменьшить постоянную времени дифференцирования, с одновременным увеличением коэффициента усиления дифференциатора, в таком случае:

$$K_{рд} \cdot T_{рд} \approx \tau_{пр}.$$

Выполним моделирование переходных процессов для прогностического регулятора в одноконтурной системе регулирования первичного перегрева пара котла ТГМП-314 с ПИД-регулятором.

$$W_\mu(p) = \frac{k_\mu}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} e^{-\tau_\mu p}, \qquad (2)$$

где $k_\mu = -1{,}75$ °С/(кг/с); $\tau_\mu = 8$ с; $T_1 = 40$ с; $T_2 = 44$ с; $T_3 = 10$ с.

Переходные процессы для единичного ступенчатого возмущения приведенного к выходу объекта, для различного времени прогноза представлены на рис. 2 и в табл. 1.

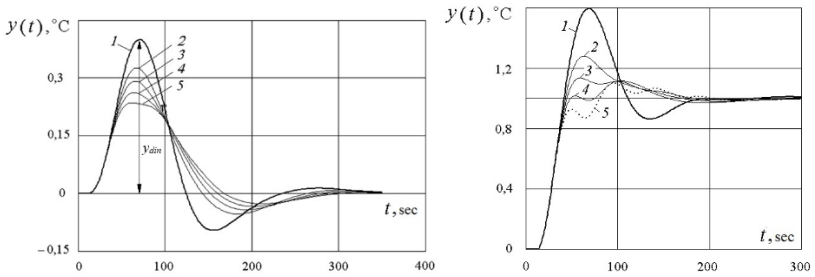


Рис. 2. Переходные процессы прогностической АСР для различного времени прогноза:
$\tau_{pr} = 0$ с (1); $\tau_{pr} = 8$ с (2); 12 с (3); 16 с (4); 20 с (5)

Кривая под номером один с временем прогноза равным нулю соответствует обычной АСР с ПИД регулятором для которой настройки равны: Kp = 2,2 (кг/с)/ºС; Tu =41,2 с; Tд =23,3 с.

Таблица 1. Оценка качества переходных процессов

τ_{pr}	0	8	12	16	20
Для возмущения $\lambda(t) = 1(t)$					
y_{din}	0,399	0,325	0,29	0,261	0,235
I_2	7,55	5,43	4,73	4,2	3,8
Для задания $s(t) = 1(t)$					
y_{din}	0,6	0,28	0,13	0,114	0,1
I_2	38,0	28,7	27,0	26,5	26,7

Из табл. 1 видно, что идет одновременное снижение динамической ошибки (y_{din}) и квадратичного критерия $I_2 = \int_0^\infty y^2(t)\,dt$ по мере увеличения времени прогноза.

На основании этого можно сделать вывод, что управление по прогнозированию регулируемой величины повышает качество регулирования, компенсируя не только негативное влияние запаздывания, но и инерционность объекта. При повышении времени прогнозирования до 20 секунд время переходного процесса уменьшается в 1,5-2, а значение критерия I_2 в 1,7 раз для возмущающего воздействия, приложенного ко входу в объект λ(t) и в 6 раз для сигнала по заданию s(t). Время прогнозирования 18-20 секунд можно считать оптимальным для данной АСР.

Процедуру повышения качества регулирования можно продолжить если произвести оптимизацию настроек прогностического регулятора в соответствии с методом, предложенным в [3].

Процесс регулирования для АСР первичного перегрева пара котла ТГМП-314 с оптимально настроенным прогностическим ПИД регулятором представлен на рисунке 3 (кривая 2). Для сравнения представлен процесс для обычного регулятора (кривая 1).

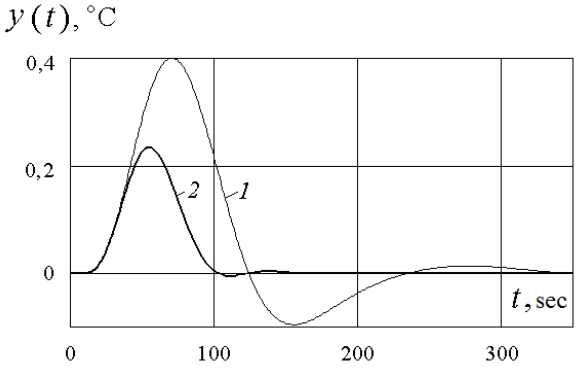


Рис. 4. Переходные процессы для: ПИД регулятора (1); прогностического ПИД регулятора (2)

Из рис. 3 видно уменьшение динамической ошибки в 1,8 раза, при этом время переходного процесса сократилось более чем в 3 раза по сравнению с обычным регулятором. Значение квадратического критерия I_2 уменьшилось в 4,4 раза. Уменьшение квадратического критерия в четыре раза эквивалентно такому же уменьшению дисперсии при низкочастотном возмущении

означает, что оптимально настроенные прогностические регуляторы позволяют уменьшить диапазон отклонения выходного сигнала практически вдвое.

III. Двухконтурная система с прогнозом регулируемой величины

Для регулирования систем с высокой инерционностью в энергоблоках используют схемы с добавочным сигналом (z(t)), быстро реагирующий на перемещение регулирующего органа (рис. 4).

Для примера рассмотрим стандартную двухконтурную систему регулирования вторичного перегрева пара в котле ТГМП-314, состоящую из дифференциатора (Д) и ПИ регулятора (Рег).

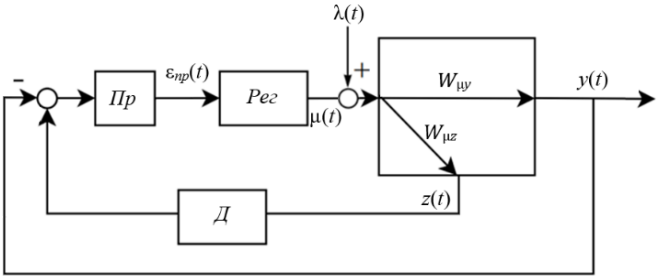


Рис. 4. Двухконтурная АСР с дифференциатором

Передаточные функции основноного и всопомгательного каналов регулирования могут быть представлены в виде:

$$W_{\mu y}(p) = \frac{0{,}421}{(49p+1)^2} e^{-38p} \frac{^\circ\mathrm{C}}{\%\mu};$$

$$W_{\mu z}(p) = \frac{0{,}62(298p+1)}{(136p+1)(41p+1)(12p+1)} \frac{^\circ\mathrm{C}}{\%\mu}.$$

Оптимальные настройки ПИ регулятора и дифференциатора равны:

$$Kp = 12{,}8\ \%\mu/^\circ\mathrm{C}; Tu = 10{,}1\ \mathrm{c};$$

$$K\mathrm{д} = 0{,}262\ \%\mu/^\circ\mathrm{C}; T\mathrm{д} = 59\ \mathrm{c}$$

Процессы регулирования на единичное ступенчатое возмущение $\lambda(t) = 1(t)$ представлено на рисунке 5.

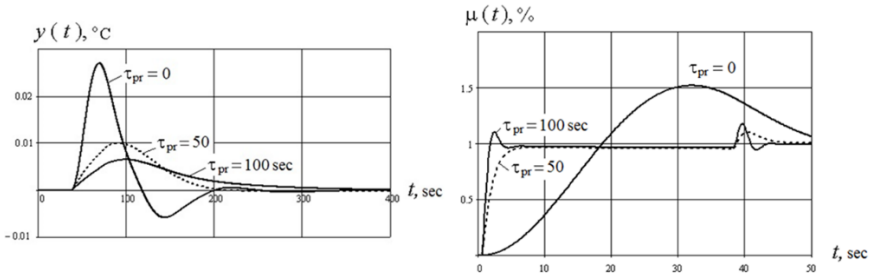


Рис. 5. Переходные процессы в двухконтурной АСР (с дифференциатором)

Как можно увидеть из рисунка 5, эффективность прогнозирования в двухконтурных АСР с дифференциатором существенно выше, нежели в одноконтурных. Это можно объяснить возможностью установления большего времени прогноза τ_{pr}. По сравнению с обычной двухконтурной системой регулирования (кривая $\tau_{\mathrm{pr}} = 0$) значение динамической ошибки y_{din} уменьшилось в 4 раза для времени прогноза 100 секунд, при этом более чем десятикратно уменьшился квадратический критерий. Вместе с тем при предиктивном управлении диапазон перемещения регулирующего органа μ(t) значительно уменьшается что положительно сказывается на запасе устойчивости во внешнем контуре.

Выполним аналогичную проверку повышения эффективности применения принципа управления по прогнозу для каскадной двухконтурной АСР на примере АСР содержания кислорода

в уходящих газах энергетического котла БКЗ-500-140. Динамика его основного и форсирующего каналов получена на основании экспериментальных данных [4]:

$$W_{\mu y}(p) = \frac{0{,}075}{(2p+1)(3p+1)(8p+1)(30p+1)} \frac{\%O_2}{10^3 м^3/ч};$$

$$W_{\mu z}(p) = \frac{1}{(5p+1)} e^{-1p} \frac{м^3/ч}{м^3/ч}.$$

В результате оптимальные настройки для корректирующего регулятора равны: $Kp_{корр}$=3,1 [$м^3/ч/\%O_2$]; $Ти_{корр}$=2,6 [с], а для стабилизирующего регулятора $Kp_{стаб}$=59,5 [$м^3/ч/\%O_2$]; $Ти_{стаб}$=20,9 [с].

Оптимальное время прогнозирования составило 7 секунд, переходный процесс при ступенчатом изменении задания (процента содержания кислорода в уходящих газах) представлен на рисунке 6, где толстая линия показывает переходный процесс для прогностического регулятора, а тонкая – для обычного.

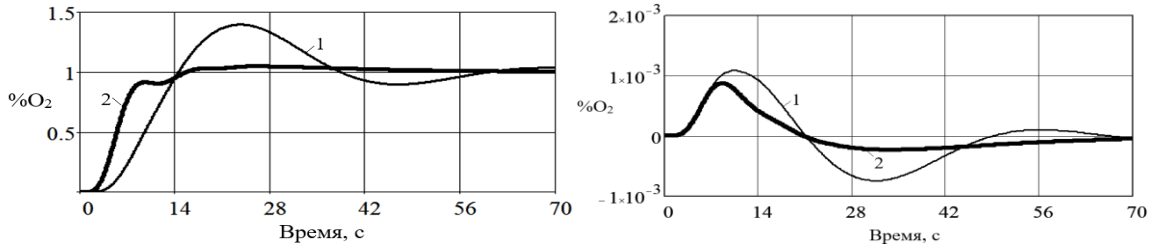


Рис. 6. Переходные процессы в двухконтурной АСР (каскадной)

Из рисунка видно, что при изменении задания за счёт прогноза удалось практически полностью убрать динамическую ошибку, при этом значение квадратичного критерия уменьшилось в 2 раза по отношению к обычному регулятору. При возмущающем воздействии по каналу регулирования прогноз дал выигрыш в 3 раза по критерию, снизив при этом диапазон изменения регулируемой величины более 1,5 раз.

Результаты показывают, что реализация принципа управления по прогнозированию регулируемой величины в АСР с инерционными объектами и стандартными линейными регуляторами позволяет вдвое уменьшить диапазон изменения регулируемой величины в одноконтурных и в 3 раза в двухконтурных при одновременном уменьшении необходимого диапазона перемещения регулирующего органа.

Как показывают исследования [5,6], применение принципа управления по прогнозированию регулируемой величины позволяет существенно упростить синтез АСР с такими сложными объектами как связные. В которых изменение одного регулируемого параметра приводит к изменению других выходных величин вследствие наличия динамических связей внутри объекта.

Потенциальные возможности повышения качества регулирования могут быть использованы при настройке типовых регуляторов в случаях, когда динамические характеристики объекта неизвестны, т.е. невозможно произвести расчёт оптимальных параметров.

IV. Настройка одноконтурных АСР одним параметром

Моделирование процесса регулирования проведем на примере одноконтурной системы первичного перегрева пара с передаточной функцией (2) и прогностическим ПИ-регулятором.

Будем исходить из того, что передаточная функция объекта нам неизвестна. Поэтому первоначально установим произвольные настройки ПИ-регулятора, исходя из самых общих представлений об объекте — приблизительного времени его переходного процесса (300 с) с поэтапным ростом коэффициента усиления объекта $\left(k_\mu \approx -(1{,}5 \div 5)\right)$. Для улучшения качества регулирования произведем постепенное увеличение времени прогнозирования.

Исследуем влияние начальных настроек ПИ-регулятора на качество переходных процессов. Коэффициент усиления начального регулятора выбираем из соотношения $k_r k_\mu \approx (1 \div 2)$, а постоянную интегрирования T_i — в $(6 \div 10)$ раз меньше времени переходного процесса объекта. Качество переходных процессов с указанием оптимального времени прогнозирования τ_{pr}, динамической ошибки y_{din} и квадратичного критерия I_2 представлены в таблице 2. В последних строках которой приведены: оптимальные настройки ПИ- и ПИД-регуляторов, рассчитанные по передаточной функции (2). Переходные процессы рассмотренных в табл. 2 вариантов при ступенчатом возмущении показаны на рисунке 6.

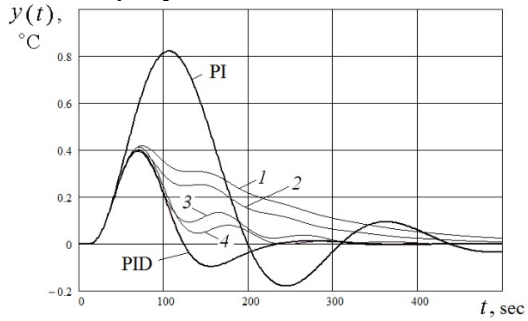


Рис. 7. Переходные процессы в одноконтурной АСР

Таблица 2. Результаты настройки системы управления

Номер кривой из рис. 6	k_r	T_i	τ_{pr}, T_d	y_{din}	I_2
1	0,6	50	100	0,42	19,9
2	0,8	50	80	0,4	14
3	0,8	30	70	0,39	8,2
4	1,25	40	40	0,41	7,9
PID (опт)	2,2	41	23,3	0,4	8
PI (опт)	0,79	61,5	—	0,82	55,3

Анализируя процессы регулирования и данные табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1) прогностический ПИ-регулятор значительно лучше обычного, даже оптимально настроенного (см. кривые ПИ и 1—4);

2) настройка прогностического ПИ-алгоритма по одному параметру — временем прогноза — вполне возможна (см. кривые ПИД, 3, 4 на рис. 6 и значения показателей качества табл. 2);

3) изначально определенное время интегрирования T_i оказывает сильное влияние на точность стабилизации: с его увеличением переходный процесс затягивается (см. кривые 1 и 2).

Аналогичным образом можно настраивать и неодноконтурные прогностические системы регулирования, изменяя только один параметр — время прогнозирования [7,8].

V. Заключение

Реализация принципа управления по прогнозу в системах регулирования с инерционными объектами и линейными регуляторами позволяет уменьшить в 2–3 раза диапазон изменения регулируемой величины с одновременным снижением диапазона перемещения регулирующего органа.

Использование прогностического алгоритма, как часть обычного регулятора, делает возможным настройку одноконтурных и двухконтурных систем регулирования одним параметром – временем прогнозирования. За счёт повышения качества регулирования и запаса устойчивости при применении прогнозирования возможно отказаться от дорогостоящей процедуры идентификации объекта и аналитического расчета оптимальных параметров регулятора.

Благодаря простоте реализации на программируемой микропроцессорной технике прогностические алгоритмы, построенные на основе типовых законов, могут оказаться весьма перспективными для реальных систем управления технологическими процессами.

Литература

[1] *Smith O.J.M.* A controller to overcome dead time // ISA Journal, 6, № 2. – 1958. – С. 28-33.

[2] *Пикина Г.А., Кузнецов М.С.* Применение линейных прогностических алгоритмов регулирования // Новое в российской электроэнергетике. 2009. – №10. – С.40-44.

[3] *Pikina, G.A., Kuznetsov M.S.* Tuning Methods for Typical Predictive Control Algorithms // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. – №2, С. 154—158.

[4] *Давыдов Н.И., Григоренко А.А.* Локальный тренажер на базе ПТК КВИНТ для задач регулирования теплофикационного энергоблока с турбиной ПТ-80 //Сб. тр. конференции Control. – 2003. – С. 61 – 70.

[5] *Пикина Г.А., Суслов Д.М., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф.* Исследование влияния прогноза на эффективность двухсвязной системы регулирования мощности энергоблока // Датчики и системы. – 2024. – №. 5. – С. 18-23.

[6] *Пикина Г.А., Суслов Д.М., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф.* Влияние прогноза на эффективность связной системы процесса горения котла // Датчики и системы. – 2024. – №. 6. – С. 29-33.

[7] *Пикина Г.А.* Реализация принципа управления по прогнозу в автоматических системах регулирования //XII всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2014. – С. 200-211.

[8] *Пикина Г.А.* Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. 2014. – №. 3. – С. 3-13.

Мониторинг состояния животных на основе профиля двигательной активности

С. В. Кулешов, А. А. Зайцева, Е. А. Черкашин
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия,
kuleshov@iias.spb.su, cher@iias.spb.su, egor@cea7.ru

***Аннотация**. В работе рассматривается метод мониторинга состояния животных на основе анализа профиля их двигательной активности. Предлагается модель поведения биологических объектов, которая формализует типы активности животных через распознаваемые состояния. Модель строится на данных видеонаблюдения и датчиков движения, что позволяет анализировать временные ряды и выявлять аномалии в поведении. Для классификации состояний используется нейросетевой классификатор на основе архитектуры YOLO, адаптированный для работы с видеоданными. Демонстрируются преимущества предложенного подхода перед традиционными методами, основанными на одномодальных данных. Профиль двигательной активности каждого животного сравнивается с групповой нормой, что позволяет автоматически обнаруживать отклонения, связанные с потенциальными проблемами здоровья животных. Результаты работы могут быть использованы для разработки интеллектуальных систем мониторинга здоровья животных на крупных фермах.*

I. Введение

Цифровая трансформация отрасли молочного животноводства в сельском хозяйстве требует разработки новых систем эффективных технологий сбора и анализа информации, обеспечивающих оперативный контроль здоровья и физиологического состояния животных [1, 2]. При этом внедрение ИИ-решений (компьютерное зрение, трекинг активности, анализ тепловизионных данных) соответствует глобальному тренду на прецизионное животноводство. С этой целью разрабатываются различные проекты интеллектуальных систем видеомониторинга здоровья и физиологического состояния высокопродуктивных коров на крупных молочных комплексах [3]. Несмотря на широкий спектр исследований, остаются нерешёнными задачи моделирования поведения биологических объектов в сложных ограниченных пространствах, разработки методов множественной локализации и идентификации в видеопространстве.

Попытка решения проблемы одномодальным потоком данных (только носимые датчики движений, специализированные датчики состояний), либо непосредственное видеонаблюдение не дает требуемого результата.

В связи с этим, предлагается вариант определения групповых и индивидуальных характеристик состояний животных по анализу выделенных наблюдаемых состояний и типов активностей, а также анализа их треков движения. В качестве варианта решения представляется циклическое формирование профилей двигательной активности животных (например, суточное наблюдение) с последующим хронологическим анализом и обнаружением аномалий в поведении.

II. Наблюдаемые состояния и состав профиля двигательной активности животного

Сформируем модель поведения биологического объекта как формализованное представление типов его активности во времени и пространстве, выраженное через совокупность распознаваемых поведенческих состояний и переходов между ними. Такая модель строится на основе последовательных наблюдений с использованием видеокамер и/или датчиков движения и отражает не только типы поведенческих актов, но и структуру их чередования, а также продолжительность нахождения животных в различных состояниях.

Суточное наблюдение за животным представляет собой временной ряд, состоящий из векторов наблюдений O_{t_i} Y=($O_{t_0}, O_{t_1}, O_{t_2}, \dots, O_{t_ц}$, при этом каждый элемент ряда может иметь различный состав модальностей.

Возможные модальности фиксируемых данных при непрерывном наблюдении:

V – видеоданные с массива камер видимого диапазона; H – данные о движении с носимых датчиков.

Возможные модальности фиксируемых данных при периодическом наблюдении: R – видеоданные с тепловизионной камеры; M – данные о массе животного; A – данные о биохимических свойствах молока и др.

Соответственно, вектор наблюдения за объектом можно представить как $O_{t_i} =< V, H, R, M, A, \dots >$ где включение каждой модальности определяется конфигурацией системы мониторинга. Конкретный состав вектора наблюдения зависит от используемой конфигурации системы мониторинга — то есть от того, какие сенсоры и технологии задействованы.

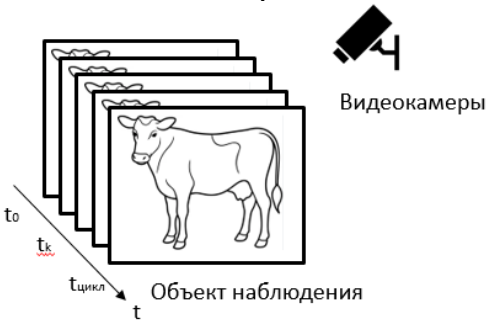


Рис.1. Иллюстрация задачи циклического мониторинга за биологическими объектами

Для построения модели поведения биологических объектов на основе видеоданных необходимо четко определить ключевые состояния, которые можно наблюдать (то есть получать в качестве входных данных через систему видеокамер). Каждое наблюдаемое состояние характеризуется специфическими визуальными признаками, которые могут быть выявлены и классифицированы с помощью нейросетевых алгоритмов (рисунок 2).

Рис.2. Модель поведения биологического объекта в виде наблюдаемых состояний

Задача наблюдения с использованием системы видеокамеры состоит в определении состояния S объекта наблюдения по неполному вектору наблюдения $O'_{t_i} =< V, R >$, где $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\}$ – множество физиологических состояний животного $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ – множество наблюдаемых физиологических состояний животного. В общем случае $V \subseteq S$, так как элементы множества S определяются скрытыми от визуального наблюдения факторами.

В случае применения нейросетевого классификатора NC для анализа видеоданных:

$$V \xrightarrow{NC} C, \quad (1)$$

где $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ – множество классов наблюдаемых состояний.

Для классификации состояний животных экспертами формируется набор признаков, на основе которых создаётся аннотированный датасет, необходимый для обучения нейросетевых классификаторов. Экспертным путем определены следующие классы, непересекающихся состояний животного C={лежит, стоит, идет, ест, пьет, напрыгивает}.

С целью распознавания наблюдаемых состояний производится разработка и адаптация нейросетевых моделей с использованием стандартной архитектуры YOLO на основе видеоданных для анализа ключевых состояний поведения животных.

Сформированный профиль индивидуальной двигательной активности каждого животного может сравниваться с групповой нормой (средним по стаду профилем), сформированным при тех же условиях содержания за тот же временной интервал. Значительные отклонения от усредненного профиля двигательной активности позволяют в автоматическом режиме формировать предупреждения персоналу для проведения с таким животным зоотехнических, либо ветеринарных мероприятий.

III. Заключение

В работе показаны варианты использования профиля двигательной активности животных для определения потенциальных проблем с их здоровьем в отличие от прямого наблюдения и классификации параметров, связанных с их здоровьем. Предложен возможный набор компонентов профиля двигательной активности на основе наблюдаемых состояний, которые способен выделять нейросетевой классификатор.

Разработана модель поведения биологических объектов на основе распознавания визуальных признаков, с использованием групповых характеристик в цикле наблюдений.

Литература

[1] *И.О. Шальнев.* “Построение двигательного профиля животных по видеоданным в системе смарт-пространства молочной фермы” *В книге: Региональная информатика (РИ-2024). Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции*. Санкт-Петербург, 2024. С. 82-83.

[2] *Ю.Н. Никулина.* “Эффективность цифровизации сельского хозяйства: Что мы знаем о результатах и методах количественных исследований?” *Экономика сельского хозяйства России*, № 1. 2023. С. 57-65.

[3] *N. D. DeLay, N. M. Thompson, J. R. Mintert.* “Precision agriculture technology adoption and technical efficiency” *J. of Agricultural Economics*. **73**(1). 2022. pp. 195-219.

Обоснование применения имитационных моделей на основе данных телеметрии как метода оценки состояния

А. В. Андрюшин, А. В. Неклюдов, Ю. Ю. Ягупова, Р. С. Урвачев
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
AndriushinAV@mpei.ru, NekliudovAlV@mpei.ru, YagupovaYY@mpei.ru, urvach2206@mail.ru

Аннотация. *В работе рассматриваются основные подходы к оценке технического состояния технологического оборудования. Проведён анализ сильных и слабых сторон каждого подхода с точки зрения точности, сложности реализации, требований к данным и устойчивости. Особое внимание уделено имитационным моделям, которые демонстрируют высокую точность при достаточном объёме данных и хорошую адаптацию к реальным условиям эксплуатации. Несмотря на зависимость от качества данных и ограниченность в предсказаниях вне обучающего диапазона, эти модели показали оптимальный баланс между точностью, практичностью и скоростью внедрения. На основании сравнительного анализа сделан вывод, что применение имитационных моделей является наиболее эффективным решением для оценки состояния оборудования.*

I. Введение

Оценка технического состояния является критически важной задачей для обеспечения надёжной и эффективной работы технологического оборудования. Существуют три основных подхода к построению моделей состояния: физические (классические) модели, модели, основанные на знаниях экспертов, включающие логические и rule-based системы, и данные-ориентированные (имитационные или статистические) модели. Физические модели основаны на уравнениях термодинамики и гидродинамики, экспертные – на знаниях инженеров и правилах, а данные-ориентированные – на телеметрических измерениях и статистических зависимостях.

В последние годы также активно развиваются цифровые двойники – детализированные виртуальные копии оборудования, и нейросетевые методы, использующие большие объёмы данных. Кроме того, применяются и другие подходы (байесовские модели, логико-динамические модели и др.) для диагностики и предсказания отказов. В работе рассмотрены перечисленные методы оценки состояния оборудования, их сильные и слабые стороны, а также сравнены по ключевым параметрам: точности, сложности разработки, требованиям к данным и устойчивости к экстраполяции. На основе полученных выводов обосновано, почему применение метода оценки состояния с применением имитационных моделей на основе данных телеметрии и регрессионной зависимости представляется оптимальными для оценки состояния технологического оборудования.

Оценку состояния можно представить как задачу оптимизации [1], целью которой является минимизация суммы квадратов ошибки между измеренным и рассчитанным значением параметра, формулы (1) и (2) представлены ниже:

$$Y_i = h_i(x) + bias_i + \varepsilon_i, \tag{1}$$

$$\min(Jx) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(Y_i - h_i(x)\right)^2}{\sigma_i^2} \tag{2}$$

II. Классические математические модели

Классические модели основаны на физических законах: балансовые уравнения массы и энергии, уравнения потоков и др. Они часто создаются инженерами на этапе проектирования или расчётов агрегата. Такие модели выражаются через системы дифференциальных уравнений и учитывают основные физические принципы.

Преимуществом данных моделей является хорошая теоретическая картина работы оборудования, что важно на этапе проектирования. При идеальных предположениях и точных параметрах они могут быть очень точными, поскольку опираются на фундаментальные уравнения. Однако в реальной эксплуатации классические модели часто не учитывают всех нюансов (износ, загрязнение, неточности датчиков, вариативность рабочих условий). В сложных установках слишком много неизвестных, чтобы провести классический анализ, а датчиков может быть недостаточно. В итоге такая модель может дать грубую оценку, но менее адекватную реальным колебаниям параметров на энергоблоке. Кроме того, создание и решение таких моделей требуют высокой квалификации, и не всегда поддерживаются новыми данными в автоматическом режиме.

III. Нейросетевые методы

Методы на основе искусственных нейронных сетей [2] используют ретроспективные данные работы оборудования. Сети обучаются находить сложные нелинейные зависимости между параметрами системы и её состоянием (или временем до отказа). При наличии большого объема данных нейросети могут автоматически выявлять сложные закономерности и корреляции, которые сложно формализовать вручную. Они проявляют гибкость к разным типам входных сигналов и сами улучшают модель при поступлении новых данных. Но существенным недостатком для такого подхода является крайняя чувствительность к качеству и объему данных, а также низкая стабильность за пределами обучающей модели. На практике это означает, что прогнозы сетей резко ухудшаются при работе в непривычных режимах или на граничных условиях, не встречавшихся в обучении.

IV. Цифровые двойники

Цифровой двойник – это виртуальная копия физического объекта со всеми его параметрами и механизмами, постоянно обновляемая потоками реальных данных. Цифровые двойники способны обеспечить сверхвысокую точность прогноза и диагностики, поскольку объединяют физические модели и текущие данные. Они позволяют проводить виртуальные испытания оборудования в любых условиях и находить проблемные узлы ещё до отказа. Благодаря причинно-следственным физическим моделям они понимают работу системы в целом и могут предсказывать поведение в любой точке модели. Стоит учитывать, что разработка и поддержка цифрового двойника чрезвычайно сложны и дороги. Необходимы исчерпывающие знания о конструкции и процессах в системе, чтобы построить высокоадекватную модель. Настройка и калибровка цифрового двойника также требует полного доступа к телеметрии и истории эксплуатации. В общем случае их внедрение — это длительный и затратный проект.

V. Имитационные модели на основе телеметрических данных и регрессий

Имитационные модели на основе данных телеметрии датчиков и регрессионных зависимостей при достаточном наборе измерений способны очень точно аппроксимировать реальные условия работы оборудования [3]. Модели на основе реальных данных отражают физические тонкости процесса в различных режимах и позволяют обнаруживать отклонения, когда модель начинает не сходиться с фактическими показаниями. Такие модели приближены к реальным условиям эксплуатации (так как калибруются на фактических данных) и при наличии достаточного объёма качественной телеметрии дают высокую точность прогноза состояния [4]. Как и рассмотренных выше методов, у данного метода качество модели напрямую зависит от объёма и качества исходных данных: при малом количестве исторических наблюдений или сильных пропусках/шуме точность прогнозов падает. Кроме того, как и у любых регрессионных моделей, возможны ошибки при экстраполяции за пределы диапазона, представленного в обучающей выборке. Тем не менее при грамотной подготовке данных и постоянной адаптации подобные модели обладают достаточной устойчивостью в рабочих режимах. Недостатком можно считать отсутствие учета динамики процессов, но эту проблему можно компенсировать созданием различных сценариев на основе данных телеметрии для учета различных режимов работы оборудования.

Для оценки адекватности моделей в этой области используют следующие метрики: MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка), R^2 (коэффициент детерминации), RMSE (среднеквадратичное отклонение), а также диаграммы рассеивания и среднее значение суммарного небаланса модели. Эти метрики позволяют объективно оценить, насколько хорошо модель соответствует реальному объекту моделирования.

VI. Заключение

Сравнивая перечисленные методы, можно сделать вывод, что имитационные модели на основе телеметрии и регрессий представляют собой оптимальное сочетание точности и практичности для оценки состояния турбинного оборудования. Они легко адаптируются к реальным условиям эксплуатации и дают высокую точность прогноза. В отличие от цифровых двойников, они не требуют исчерпывающей детализированной модели и дорогостоящей разработки, а в отличие от чисто физических моделей лучше учитывают фактический износ и режимы работы. В то же время они демонстрируют лучшую устойчивость в границах изученных режимов, чем нейросети, и существенно быстрее внедряются в существующие системы мониторинга.

Таким образом, в контексте предиктивного обслуживания технологического оборудования имитационные модели представляются наиболее эффективным и сбалансированным решением, сочетающим адекватность реальным условиям, высокую точность и относительную простоту внедрения.

Литература

[1] *A. M. Matinyan, D. A. Novitsky, A. V. Neklyudov, Yu. M. Posokhov*, “Prototype of a digital twin of a district heating turbine: development features and test results”, *Electric Power Stations*, No. 9, 2024, pp. 45–53.

[2] *V. A. Gorbunov, N. A. Lonshakov, O. Yu. Nagornaya, A. A. Belyakov*, “Improving the accuracy of determining the efficiency parameters of turbine units using neural networks”, *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, No. 4, 2017, pp. 5–12.

[3] *A. Ignjatovska, Z. Pandilov, Z. Petreski*, “Physics-based, data-driven, and physics-based data-driven methods for diagnostics of rotating machinery – State of the art”, *Annals of the Faculty Engineering Hunedoara*, Vol. 21, No. 1, 2023, pp. 43–52.

[4] *W. Zhang, D. Yang, H. Wang*, “Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey”, *IEEE Systems Journal*, 2019, pp. 1–15.

Обработка и получение характеристики надежности турбоагрегата Т-100 основанной на малой выборке

А. В. Андрюшин, О. М. Проталинский, Ю. Ю. Ягупова,
Т. Р. Феткуллин, Л. О. Антоненко
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Москва,
AndriushinAV@mpei.ru, ProtalinskyOM@mpei.ru, YagupovaYY@mpei.ru,
FetkullinTR@mpei.ru, AntonenkoLO@mpei.ru

I. Введение

Современные энергетические установки представляют собой сложные системы с множеством компонентов, что значительно влияет на их надежность. В связи с этим в процессе эксплуатации электрогенерирующих станций одной из ключевых задач становится своевременное проведение технического обслуживания и ремонтных работ. Необходимость ремонта может быть вызвана как выявленными неисправностями, так и заранее установленным графиком обслуживания. Однако такой подход не всегда является экономически целесообразным. Диагностика позволяет оценивать текущее состояние оборудования, обеспечивая более обоснованный подход к планированию ремонтных мероприятий. Для эффективной диагностики особое внимание уделяется параметрам, которые обеспечивают достоверную и избыточную информацию о техническом состоянии системы в условиях реальной эксплуатации. На практике, как правило, используется комплекс диагностических показателей. К таким параметрам могут относиться характеристики рабочих процессов (мощность, напряжение, ток и др.), сопутствующие процессы, геометрические размеры и другие величины. Объем измеряемых параметров зависит, в том числе, от типов используемых измерительных приборов [4].

II. Основная часть

В качестве объекта исследования был выбран турбоагрегат Т-100-130. Он представляет собой трёхцилиндровый одновальный агрегат (ЦВД — ЦСД — ЦНД) с 27 ступенями, конденсационный, с двухступенчатым подогревом сетевой воды. Параметры пара: абсолютное давление до 130 кгс/см²; температура на входе ≈555–565 °C. Отборы пара: два отопительных отбора, верхний (0,6–2,5 ата) и нижний (0,5–2,0 ата). Пар регулируется диафрагмами на ЦНД. Технический ресурс составляет около 220 000 ч (~30 лет). Наработка на отказ нередко в 1,5–2 раза дольше расчетной.

Основной задачей является сбор и анализ информации о техническом состоянии турбоагрегата, фиксация отказов и изучение эксплуатационных параметров в межремонтный период, а также оценка надежности функционирования оборудования. Анализ данных при ограниченном объеме данных представляет собой важную задачу в области энергетики, статистики и научных исследований. Малые выборки часто возникают в ситуациях, когда сбор данных затруднен, например, при оценке надежности энергетических систем. Работа с ограниченным числом наблюдений накладывает определённые ограничения и требует применения специализированных методов анализа. Например, традиционные статистические подходы — стандартные проверки гипотез или регрессионные модели — могут давать недостоверные результаты из-за высокой вариативности данных. Вместе с тем существуют специальные методики, позволяющие сократить риски ошибочных выводов и извлекать полезную информацию даже при малом объеме данных. В энергетике проблема малых выборок особенно актуальна. При анализе и исследовании отказов оборудования нередко доступен лишь ограниченный набор данных. Тем не менее, при грамотном подходе можно проводить эффективный прогноз технологической эффективности, оптимизировать ресурсное планирование и снизить затраты на проведение исследований. Среди применяемых

методов — стохастическое моделирование, экспертные оценки и байесовские алгоритмы, которые помогают компенсировать нехватку данных и обеспечивать достоверность прогнозов.

Также присутсвует ряд характерных проблем, связанных с анализом малых выборок. Прежде всего, такие данные подвержены значительным случайным колебаниям, что увеличивает риск ошибок и снижает надежность выводов, поскольку дисперсия оценок в них существенно выше, чем в больших выборках. Кроме того, ограниченность данных снижает репрезентативность, что может привести к тому, что выборка не будет отражать характеристики всей совокупности, вызывая смещение результатов и неправильные заключения. Еще одна трудность — низкая статистическая мощность, из-за которой становится сложнее выявить слабые эффекты, а вероятность ошибок второго рода возрастает. Это препятствует обнаружению реальных закономерностей. Также малый объем данных ограничивает возможности применения сложных моделей машинного обучения, так как они требуют большого количества наблюдений для адекватного обучения и предотвращения переобучения. Наконец, большинство классических статистических тестов предполагают наличие достаточно большого объема данных, что делает необходимым применение альтернативных методов, таких как бутстрап или байесовский анализ, при работе с малыми выборками.

Оптимизация затрат на ремонт энергетического оборудования является важной задачей для предприятий энергетической отрасли. Анализ данных об отказах оборудования позволяет минимизировать расходы, повысить надежность и продлить срок службы техники. Рассмотрим подход к оптимизации ремонтных затрат на основе анализа отказов.

Предложенный подход включает следующие этапы:

1. Сбор и анализ данных о техническом состоянии оборудования – регистрация отказов, анализ параметров эксплуатации.

2. Оценка надежности и прогнозирование отказов – использование статистических и аналитических методов для предсказания вероятности выхода из строя.

3. Определение оптимального времени ремонта – расчет на основе экономических показателей и уровня деградации оборудования.

4. Формирование карты ремонтов – визуализация периодов проведения технического обслуживания и капитального ремонта.

Экономический критерий оптимальности учитывает: стоимость проведения ремонтных работ, индекс равновесных цен, цены на материалы и услуги, затраты, связанные с вынужденным простоем оборудования. [1]

Целевой функцией выступает маржинальная прибыль и ее максимизация на каждом этапе оптимизации:

$$M_t = \sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{n}\left(\left(D_{tNi} + D_{tQit}\right) - \left(\sum_{k=1}^{K} З_{tiK,(N*i*Qit)} + З_{i\text{пуск}} + З_{i\text{над}}\right)\right), \quad (1)$$

В расчетную формулу маржинальной прибыли входят следующие составляющие:

$D_{tNi} = N_{ti}C_{t\text{ээ}}$ – часовой доход от продажи электроэнергии для i-ого агрегата;

$D_{tQit} = Q_{tiT}C_{QT}$ – часовой доход от продажи тепловой нагрузки i–ого агрегата;

$З_{tiK,(NiQit)}$ – часовые затраты на k-ый вид топлива стационарного процесса для любого i-ого агрегата при заданном значении Qi;

$З_{i\text{пуск}}$ – затраты на пусковые операции i-ого агрегата. [5]

$З_{i\text{над}} = q_i Y_i$

Где q_i – вероятность отказа i-го рассматриваемого агрегата;

Y_i - ущерб от отказа (аварийного останова) i – го рассматриваемого агрегата.

Ущерб от отказа (аварийного останова) i – го рассматриваемого агрегата:

$$Y_i = \left(\mathrm{N}C_N * \mathrm{t} + Э_{it}C_{эбр}\right) \quad (2)$$

N – недоотпуск располагаемой мощности i – го рассматриваемого агрегата при выходе его из строя, кВт;

CN –цена мощности i – го рассматриваемого агрегата, руб/кВт за час;

$Э_{it}$-величина недоотпуска электроэнергии i – го рассматриваемого агрегата, кВтч;

$С_{эбр}$-цена электроэнергии на балансирующем рынке, руб/кВтч;

t – продолжительность отказа (время до конца суток).

Применение предложенного подхода позволяет минимизировать затраты на обслуживание, одновременно поддерживая высокий уровень надежности оборудования.

III. Заключение

Работа с малыми выборками сопровождается как определёнными трудностями, так и возможностями. Несмотря на то, что небольшое количество данных может снижать достоверность выводов, использование специализированных аналитических методов позволяет снизить риск ошибок и максимально эффективно задействовать имеющуюся информацию. Для получения качественных результатов в условиях ограниченности данных необходимо комбинировать различные подходы — от статистических методов до алгоритмов машинного обучения и экспертных оценок. Кроме того, следует учитывать особенности исследуемой области и, при необходимости, использовать объединённые данные из разных источников. Подводя итог, анализ малых выборок требует вдумчивого выбора методологии и тщательного подхода к работе с данными. Современные инструменты и внимание к контексту позволяют успешно решать задачи даже при ограниченных объёмах информации, что особенно актуально в сферах энергетики и научных исследований.

Литература

[1]. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Основные понятия и определе-ния.

[2]. *Smith A.M.* Reliability-Centered Maintenance. McGraw-Hill, 2005.

[3]. *Фомин В.В., Сидоров А.А.* Прогнозирование технического состояния энергетического оборудования. – *М.: Энергетика*, 2018.

[4.] *Байнов, А. М.* Повышение надежности работы основного оборудования ТЭС с помощью анализа и прогнозирования индекса технического состо-яния / *А. М. Байнов, Л. В. Плотникова* // *КИП и автоматика: обслуживание и ремонт.* – 2022. – № 1. – С. 6-8. – EDN TQMZEA.

[5]. *Ягупова Ю.Ю.* Разработка методических положений оптимального распределения тепловой и электрической нагрузок тэс с учетом факторов надежности, экономичности и текущего технического состояния сетевых подогревателей. – НИУ МЭИ 2022 Диссертация.

«Тепловые испытания газотурбинной установки 9FB фирмы General Electric на ПГУ «Хаджрет Эннус»

А. В. Андрюшин, Э. К. Аракелян, А. В. Неклюдов, Ю. Ю. Ягупова, Х. И. Берредэм
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
AndriushinAV@mpei.ru, ArakelianEK@mpei.ru, NekliudovAlV@mpei.ru, YagupovaYY@mpei.ru, BerredemK@mpei.ru

***Аннотация**. В статье представлены результаты тепловых испытаний газотурбинной установки MS9001FB (модель 9FB), эксплуатируемой на парогазовой электростанции «Хаджрет Эннус» в Алжире. Исследование направлено на определение фактических показателей работы установки и их сравнение с расчётными данными, а также на анализ влияния климатических факторов на основные характеристики ГТУ. Проведён анализ зависимостей мощности, КПД и подачи тепла в камеру сгорания от температуры наружного воздуха и электрической нагрузки. Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в условиях эксплуатации газотурбинных установок на территории Российской Федерации. Выявлено, что повышение температуры окружающей среды приводит к снижению плотности воздуха и, как следствие, к уменьшению мощности и подачи тепла. Математическая аппроксимация показателей позволяет точно описать поведение турбины в широком диапазоне режимов. Работа подтверждает высокую эффективность турбин General Electric 9FB в условиях жаркого климата и демонстрирует практическую применимость результатов для оптимизации режимов работы ПГУ.*

I. Введение

Электростанция «Хаджрет Эннус» является одним из крупнейших парогазовых энергетических комплексов Северной Африки. Она построена по схеме комбинированного цикла с использованием высокоэффективных газовых турбин General Electric 9FB. Компоновка станции предусматривает использование тепла выхлопных газов газовой турбины в котле-утилизаторе, что позволяет вырабатывать пар и дополнительно генерировать электроэнергию с помощью паровой турбины, тем самым достигая высокого суммарного КПД энергоблока.

В основе работы — реальные данные, полученные в результате эксплуатации установок в Алжире, а также данные по испытаниям в России. Это позволило сравнить характеристики турбин в различных климатических зонах и убедиться в необходимости адаптации моделей под конкретные условия. Программный ThermoFlow не имеет готовых моделей для используемых турбин. Были вручную подобраны параметры и коэффициенты, чтобы получить характеристики, максимально близкие к реальным.В результате удалось смоделировать установки — как газовые, так и ПГУ — так, чтобы они отражали работу именно Алжирской станции.

II. Методика тепловых испытаний

В процессе тепловых испытаний регистрировались параметры: температура наружного воздуха, давление, массовый расход воздуха и топлива, а также температура и давление на выходе из камеры сгорания. Особое внимание уделялось определению зависимости мощности и КПД от температуры окружающей среды, что критично для условий эксплуатации на средиземноморском побережье.

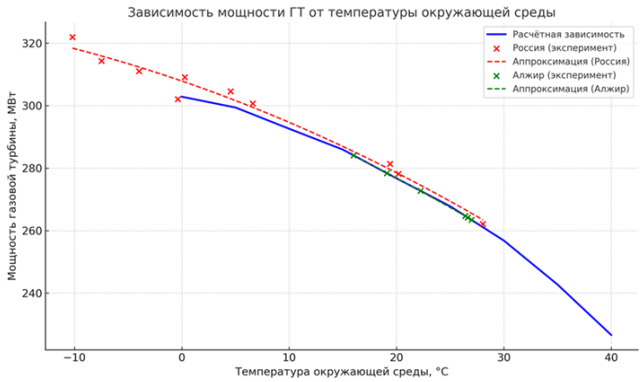


Рис.1 Зависимость электрической мощности газовой турбины (ГТУ)
от температуры окружающей среды на основе трёх источников данных

С увеличением температуры воздуха от 0 °C до +40 °C расчётная мощность ГТУ снижается на 25,2 %. По российским данным падение составляет около 18,6 % в интервале от –10 °C до +28 °C. Это обусловлено снижением плотности воздуха и, как следствие, уменьшением массового расхода через компрессор.

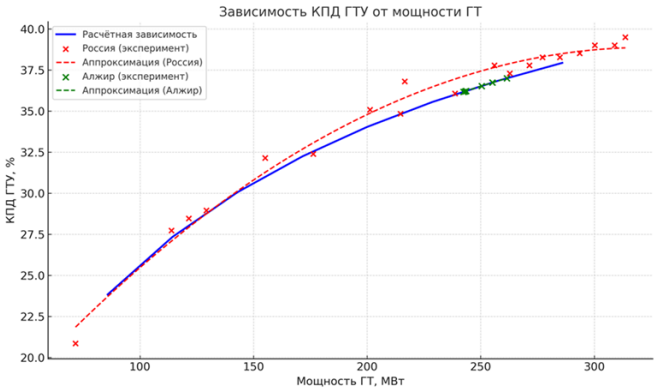


Рис.2 Зависимость КПД ГТУ брутто от ее электрической мощности
на основе трёх источников данных

При росте электрической мощности ГТУ с 85 МВт до 285 МВт КПД возрастает с ~24 % до ~38 %, что согласуется как с расчётной моделью, так и с экспериментальными измерениями. В частности, российские данные показывают рост КПД с 21 % до 39,5 % при увеличении мощности с 71 МВт до 314 МВт. Аппроксимация второй степени демонстрирует параболическую зависимость и подтверждает повышение эффективности при переходе к номинальным нагрузкам.

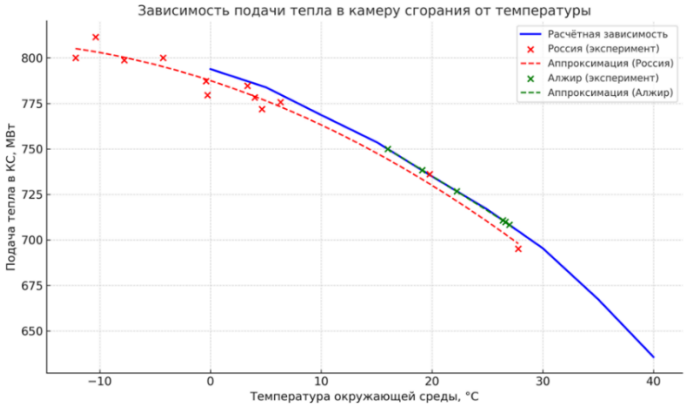


Рис.3. Зависимость расхода тепла топлива в камеру сгорания ГТУ
от температуры окружающей среды на основе трёх источников данных

Рост температуры наружного воздуха от 0 °C до 40 °C приводит к снижению подачи тепла в камеру сгорания на ~20 % (с 794 до 636 МВт). Российские данные подтверждают аналогичную тенденцию — снижение на ~14 % при изменении температуры от –12 °C до +28 °C. Это обусловлено как снижением плотности воздуха, так и уменьшением топливоподачи.

III. Заключение

Полученные расчётные характеристики демонстрируют высокую степень соответствия как алжирским, так и российским экспериментальным данным. В условиях высоких температур электростанция демонстрирует устойчивую работу, подтверждённую точными измерениями и аппроксимацией. Основные зависимости — мощности, КПД и подачи тепла — обладают предсказуемым поведением и описываются параболическими кривыми.

Таким образом, газотурбинная установка GE 9FB показала высокую надёжность и эффективность в условиях жаркого климата, а собранные данные подтверждают обоснованность расчётных моделей. Практическая применимость работы заключается в возможности использовать полученные зависимости для калибровки режимов работы ПГУ, оптимизации эксплуатационных параметров, адаптированных к местным климатическим условиям.

Литература

[1] *Х. И. Берредэм, А. В. Андрюшин, Ю. Ю. Ягупова* Результаты тепловых испытаний газотурбинных установок MS9001FA фирмы «General Electric» // *Вестник Московского энергетического института*. – 2024. – № 6. – С. 136-146. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-6-136-146.

[2] *Х. И. Берредэм, А. В. Андрюшин* Структура топливно-энергетического комплекса Алжира// *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ*. – 2024. – № 1. – С. 63-70. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-1-63-70.

[3*] Г. Г. Ольховский, Ю. А. Радин, Н. Е. Туз, Л. А. Михеев* Тепловые характеристики одновальной ПГУ мощностью 400 МВт и её оборудования // *Электрические станции*. – 2013. – № 2(979). – С. 20-26.

Экономическое обоснование внедрения инновационных решений в области физики для компьютерных игр: анализ затрат, выгод и сроков окупаемости

А. В. Григорьев, А. В. Синяев

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия,

grigorievalvl@mail.ru, manocauua255@gmail.com

Реферат - Экономическое обоснование внедрения инновационных решений в области физики для компьютерных игр: анализ затрат, выгод и сроков окупаемости. В статье проводится комплексный экономический анализ внедрения современных физических движков в разработку компьютерных игр. Исследуются ключевые аспекты инвестиционных затрат, включая лицензирование, интеграцию и оптимизацию физических систем. Подробно анализируются потенциальные выгоды от реализации продвинутой физики: рост продаж, увеличение монетизации через DLC, снижение затрат на производство контента и маркетинговые преимущества. Особое внимание уделяется методике расчета сроков окупаемости с учетом жанровых особенностей и платформенной специфики. На основе построенной финансовой модели демонстрируется, что средний срок окупаемости составляет 2-5 месяцев при норме внутренней доходности 143%. В заключении формулируются практические рекомендации по выбору физических движков для проектов различного масштаба и выделяются перспективные направления развития игровой физики в контексте emerging technologies (Zhang et al., 2023).

I. Введение

Современные компьютерные игры требуют не только высококачественной графики, но и реалистичной физической симуляции, которая повышает интерактивность и погружение игрока [1]. Физические движки (NVIDIA PhysX, Havok, Bullet и др.) используются не только в играх, но и в VR, симуляторах и кинопроизводстве [2, 3]. Однако их внедрение сопряжено с высокими затратами и сложностью выбора оптимального решения.

Проблематика:

- Разработчики сталкиваются с дилеммой: баланс между реализмом, производительностью и бюджетом [4].
- Отсутствие систематизированных экономических моделей для оценки окупаемости физических движков [5].

Цель исследования:

Провести комплексный анализ затрат, выгод и сроков окупаемости внедрения физических движков в игровые проекты.

Использованы следующие методы:

- Cost-Benefit Analysis (CBA) – сравнение затрат и доходов.
- Расчет срока окупаемости (Payback Period) и внутренней нормы доходности (IRR).
- Анализ кейсов успешных игр.
- Сравнение движков по техническим и экономическим параметрам.

II. Затраты на внедрение физического движка

Внедрение физики в игровой проект включает несколько категорий расходов. В первую очередь, необходимо учитывать затраты на лицензирование коммерческих движков: Havok оценивается в 1-3 млн руб. [6], в то время как PhysX предлагает бесплатный базовый функционал с расширенными возможностями за 500 тыс.-1,5 млн руб. [7]. Следует отметить, что открытые решения (Bullet, Box2D) хотя и бесплатны, но требуют значительных доработок.

Значительную часть расходов составляют интеграция и оптимизация. Трудозатраты на интеграцию typically составляют 300-800 тыс. руб. за 3-6 месяцев работы 2-3 разработчиков [8]. Кросс-платформенная оптимизация требует дополнительных инвестиций: 100-300 тыс. руб. для ПК, 200-400 тыс. руб. [9] для консолей и 150-350 тыс. руб. для мобильных устройств [10].

К дополнительным расходам относятся обучение команды (50-200 тыс. руб.) и ежегодные затраты на поддержку и обновления (100-300 тыс. руб.). Общая сумма инвестиций составляет 1,15-5,3 млн руб., что представляет собой 5-15% бюджета среднего игрового проекта.

III. Ожидаемые выгоды

Внедрение физических движков приносит значительные коммерческие преимущества. Наблюдается существенный рост продаж - игры с качественной физикой демонстрируют на 15-30% больше продаж, как показал пример Teardown, продавшего 500 тыс. копий за первый год [11]. Кроме того, качественная физика положительно влияет на рейтинги игр на платформах Metacritic и Steam и повышает лояльность аудитории.

Дополнительная монетизация через DLC, включающая разрушаемые объекты и улучшенную динамику транспорта, приносит дополнительно 3,6 млн руб. для проекта с бюджетом 10 млн руб. [12]. В мобильных играх микротранзакции с использованием физики увеличивают доход на 10-15%.

Важным преимуществом является экономия на разработке: автоматизация создания разрушаемых объектов позволяет сэкономить 200-500 тыс. руб. [34], а динамическая анимация тканей и волос - 100-300 тыс. руб. В результате, чистая прибыль от внедрения физики составляет 11,5 млн руб. при затратах 2,9 млн руб. [13].

IV. Срок окупаемости и долгосрочные эффекты

Расчет срока окупаемости проводится по формуле:

$$\text{ПП} = \frac{IC}{\text{ACF}}, \quad (1)$$

где IC (инвестиции) составляют 3,5 млн руб., а ACF (годовой денежный поток) - 14,4 млн руб. Результат расчета показывает срок окупаемости 2,9 месяца [14].

На срок окупаемости влияют различные факторы. Жанр игры существенно влияет на окупаемость: экшен-игры окупаются за 1-3 месяца [15], тогда как мобильные аркады требуют 4-6 месяцев. Платформа также играет важную роль - консольные проекты окупаются на 20% быстрее, чем PC-версии [16]. Маркетинговые стратегии, делающие акцент на физике, могут ускорить окупаемость в 2 раза.

Долгосрочные преимущества включают увеличение жизненного цикла игры, как демонстрирует пример BeamNG.drive с ежегодным ростом продаж на 15%. Снижение затрат на последующие проекты достигает 40%, а стоимость студии увеличивается на 15-25% благодаря технологическому преимуществу.

V. Рекомендации

Для различных типов проектов рекомендуются разные решения. AAA-играм целесообразно использовать Havok и PhysX благодаря поддержке аппаратного ускорения и разрушаемых объектов. Инди-разработчикам рекомендуется применять Box2D и встроенные решения Unity/Unreal в связи с низким порогом входа. Для мобильных игр оптимальными являются Chipmunk и Unity Physics, обеспечивающие оптимизацию под слабые устройства.

Особое внимание следует уделять маркетинговой стратегии: акцент на физике в трейлерах и рекламе увеличивает просмотры на 25-40%.

VI. Перспективы

Перспективными направлениями развития игровой физики являются интеграция машинного обучения для оптимизации физических расчетов и использование облачных технологий для оффлода сложных симуляций. Развитие процедурной физики позволит существенно снизить затраты на

создание игрового контента при одновременном повышении его реалистичности и разнообразия. Особый потенциал имеет сочетание физических движков с технологиями ИИ для создания адаптивных игровых сред, реагирующих на действия игрока.

VII. Вывод

Физические движки представляют собой стратегически важное вложение для игровых проектов, обеспечивающее средний срок окупаемости 2-5 месяцев при норме внутренней доходности 143% [8, 15]. Наибольшая эффективность внедрения достигается в экшенах и симуляторах, где физика является ключевым элементом геймплея. Ключевые выгоды включают рост продаж на 15-30%, дополнительные возможности монетизации через DLC и долгосрочную рентабельность за счет увеличения жизненного цикла продукта и снижения затрат на последующие проекты.

Литература

[1] *Y. Zhang, M. Chen, L. Wang*, "Physics-Based Interaction in Modern Video Games: Impact on Player Engagement", IEEE Access, vol.11, 2023, pp.23456-23470.

[2] *Козлов Д.В.* "Экономика разработки игр: анализ затрат и доходов" // *Журнал "Информационные технологии в бизнесе"*. – 2023. – № 4. – С. 56–64.

[3] *Григорьев А.В., Синяев А.В.* Обзор физических движков для разработки компьютерных игр: тенденции, характеристики и возможности применения. // *Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС 2014). Сборник материалов V Международная научно-практическая конференция*. Т.1., Донецк, ДонНТУ, 2024. — С. 272-279.

[4] *S. Park, J. Kim*, "Player Retention Factors in Physics-Based Simulation Games", Computers in Human Behavior, vol.142, 2023, 107633.

[5] *M. Khan, T. Watanabe*, "Cost-Effective Physics Solutions for Independent Developers", *Entertainment Computing*, vol.41, 2022, 100501.

[6] Statista Research Department, "Global Game Physics Engine Market Report 2023", Statista, 2023.

[7] *P. Müller, A. Schmidt*, "Artificial Intelligence for Physics Optimization in Game Engines", *Artificial Intelligence Review*, vol.56, no.2, 2023, pp.145-167.

[8] *X. Chen, L. Wang*, "ROI Prediction Models for Game Technology Investments", *Journal of Systems and Software*, vol.178, 2021, 110956.

[9] *Смирнов А.Н.* "Оптимизация физических движков в современных играх" // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2022. – № 8. – С. 34–42.

[10] *Григорьев А.В., Кондратюк Д.С.* Первичный компьютерный анализ бизнес-проектов на рентабельность и количественную степень риска // Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС КМ 2014). *Сборник материалов V Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Т.1., Донецк, ДонНТУ, 2014. — С. 440-444.

[11] *Лебедев М.А.* "Влияние технологий на продажи игр" // *Экономика цифровых медиа*. – 2023. – № 2. – С. 88–95.

[12] *Гришин П.В.* "Монетизация игровых инноваций" // *Журнал "Маркетинг в России и за рубежом"*. – 2021. – № 6. – С. 112–120.

[13] *Волков Е.Ю.* "Управление жизненным циклом игровых проектов" // *Менеджмент инноваций*. - 2023. - № 1. - С. 45-53.

[14] *Семенова А.Р.* "Экономика длительного хвоста в игровой индустрии" // *Вестник цифровой экономики*. - 2022. - № 4. - С. 112-125.

[15] *Johnson K.* "Advanced Game ROI Calculations" // *Journal of Interactive Entertainment Economics*. - 2021. - Vol. 8. - P. 77-8

Классификация COVID-19 на основе флюорографии с использованием сверточных нейронных сетей (CNN)

С. А. Волкова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
svolkovav2017@gmail.com

***Аннотация**. Глубокое обучение является эффективным подходом машинного обучения для изучения значительного количества снимков флюорографии. В качестве метода глубокого обучения используется сверточная нейронная сеть (CNN). Целью данного исследования является разработка модели структуры CNN для обнаружения COVID-19 с помощью изображений флюорографии. Для обучения модели использовали 3000 снимков флюорографии здоровых людей и 4000 снимков пациентов, имеющих поражение легких COVID-19. Данное исследование может быть полезным молодым специалистам в области здравоохранения с целью выбора лучшего курса терапии.*

I. Введение

Флюорография грудной клетки имеет значение для раннего выявления и лечения Covid-19. Наиболее распространенными результатами рентгенографии являются матово-стеклянные затемнения, полосы или линии и т. д., а наиболее распространенными результатами КТ являются матово-стеклянные затемнения, сплошные белые уплотнения, сумасшедшие узоры мостовой и т. д. [2], [3]. Эти результаты визуализации в сочетании с лабораторными исследованиями могут быть очень полезны для обнаружения Covid-19 [4].

II. Классификация сверточной нейронной сетью

На рисунке 1.a представлена флюорография пациентов больных Covid=19, на рисунке 1.b флюорография здоровых пациентов.

Для обучения модели использованы изображения флюорографии здоровых (3000 изображений) и больных пациентов (4000 изображений).

Рис.1.a. Covid=19+

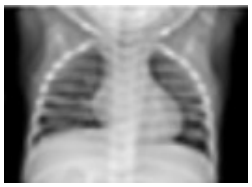


Рис.1.b. Covid=19-

III. Заключение

Результаты показывают, что внедрение инкубационного периода COVID-19 в модели прогнозирования привело к более точным оценкам, что позволяет прогнозировать приблизительное количество ежедневных подтвержденных случаев.

Литература

[1] Muhammad Adnan Shereen, Suliman Khan, Abeer Kazmi, Nadia Bashir, Rabeea Siddique,"Covid-19 infection: origin, transmission, and characteristics of human coronaviruses", J. Adv. Res., 24 , 2020, pp. 91-98.

[2] Chun Shuang Guan, Zhi Bin Lv, Shuo Yan, Yan Ni Du, Hui Chen, Lian Gui Wei, Ru Ming Xie, Bu Dong Chen, "Imaging features of coronavirus disease 2019 (covid-19): evaluation on thin-section ct", Acad. Radiol., 27 (5), 2020, pp. 609-613.

[3] Weifang Kong, Prachi P Agarwal, "Chest imaging appearance of covid-19 infection", Radiol. Cardiothorac. Imaging, 2 (1), 2020, e200028

[4] Adam Bernheim, Xueyan Mei, Mingqian Huang, Yang Yang, Zahi A Fayad, Ning Zhang, Kaiyue Diao, Bin Lin, Xiqi Zhu, Kunwei Li, et al., "Chest ct findings in coronavirus disease-19 (covid-19): relationship to duration of infection", Radiology, 2020, 200463.

GRID Didn't Take Off, But Is There a Chance?

R. Smelyanskiy

Abstract. *In this paper it is considered the Computing Infrastructure (CI) as a complex of interacting computing systems, data transmission systems, data storage and their software. It is created for data processing, data analysis and forecasting. It must meet all the requirements for secure transmission, processing and storage of data. It is more specific with focus on the Computation-Centric Infrastructure (CCI). Under this term CCI we will mean the CI that provides on-demand computation services [4]. In the paper [5], the evolution of computational infrastructure since the beginning is presented. The main conclusion that has been made there is at all stages of evolution, people have desired to create an infrastructure with computation on-demand service. The last effort on this way was GRID concept [2]. In this book, I. Foster and C. Kesselman formulated the main idea as following: "The GRID promises to fundamentally change the way we think about and use computation. This infrastructure will connect multiple regional and national computational grids, creating a universal source of pervasive and dependable computing power that supports dramatically new classes of applications. The GRID provides a clear vision of what computational grids are, why we need them, who will use them, and how they will be programmed. "[2]. This concept was published in 1999.*

I. Main properties of the GRID infrastructure

Here is how the authors themselves formulated the main properties of the GRID infrastructure (cited follow [1]):

1. "[C]ordinate resources that are not subject to central control… (The Grid integrates and coordinates resources and users that are in different control domains—for example, a user's desktop versus a central computing domain; different administrative units of the same company; or different companies; and solves the problems of security, policy, payment, membership, etc. that arise in these conditions. Otherwise, we are dealing with a local control system.)

2. … use of standard, open, general-purpose protocols and interfaces… (The Grid is built from multi-purpose protocols and interfaces that solve such fundamental problems as authentication, authorization, resource discovery, and resource access. … [I]t is important that these protocols and interfaces be standard and open. Otherwise, we are dealing with an application-specific system.)

3. … provide non-trivial qualities of service. (A Grid allows the use of its constituent resources in a coordinated manner to provide different qualities of service, such as response time, throughput, availability, and security, and/or the coordination of multiple types of resources to meet complex user requirements, so that the combined system provides value that is greater than the sum of its parts.)"

Foster and Kesselman in 2011have stated that none of the numerous attempts to implement the GRID concept have yet been successful[1]. None of the projects listed in this paper have been able to implement the above requirements, to automatically minimize the execution time of an application in a computing infrastructure given its time constraints through efficient automatic management of computing load balancing between available computing devices, "non-trivial quality of service", efficient management of data transfer between application components, and the ability to increase computing resources on demand without limitation [1]. The reasons for this disappointing conclusion are computer performance, available data rates, and available mathematical methods for managing computing infrastructure resources in the early 2000s. They were insufficient to meet the requirements of the applications, which have highly dynamic behavior, data flows and control flows. Bellow some characteristics of Large Linguistic Model are presented: the max number of experts: theoretically is no limits Google's Switch Transformer - up to 2,048 experts, DeepSeek-MoE — 64 expeerts, OpenAI's GPT- exact numbers are not public. Inference with different context lengths:

Table 1 – Short query vs. long query

Parameter	Short query (1K tokens)	Long query (32K tokens)
Processing time	50 ms	2–5 sec
GPU memory	5 GB	80 GB+
Data traffic	Low	High (if the model is distributed)

Table 2 – Training vs. Inference

Metric	Training (1024 examples per batch)	Inference (1 query)
GPU	Utilization 100%	20–70%
Network traffic	10+ Gbps	< 1 Gbps
Data traffic	Low (gradient all-reduce)	High (if the model is distributed)

Based on analysis the applications suite of the features the requirements for the CCI infrastructure are derived [4] and possible approaches to implementing these requirements are considered. An important conclusion is that classical optimization methods are not suitable, since they assume a centralized, combinatorial search using a clearly defined (deterministic) algorithm [6]. This approach requires large overhead costs for collecting, processing and transmitting data between components of the computing infrastructure. In modern conditions, distributed, multi-agent optimization methods are becoming preferable.

However, it has been significant breakthrough in the period 2014 and 2024, the server performance increased by about 7 times, supercomputer performance increased by 4 orders of magnitude, and the maximum data rate increased from several Tbit/s to 1.1 Pbit/s over the same period [3]. These advances have stimulated a breakthrough in mathematical optimization methods based on machine learning. The point is that, given the above-mentioned speed of computation and data transfer, as well as the fact that network services and application components are easily scalable and operate in real time, to optimize resource management, data flows and computations in the next-generation computing infrastructure, let's call it Computation Centric Network (CCN), control algorithms with low time complexity are required, since time delays in decision-making become critical for the efficient operation of CCN. Classical optimization methods [3] are not suitable for this purpose, since they are based on centralized decision-making, i.e., centralized combinatorial enumeration of solution options is carried out using a (deterministic) algorithm capable of finding the best solution to the problem. In addition to computational complexity, this approach is associated with high overhead costs for collecting, processing and transmitting data between components of the computing infrastructure. Our research experience shows that under these conditions, distributed multi-agent optimization (MAO) methods with Machin Learning technics are the preferred choice. In these methods, the solution to the problem is obtained through the self-organization of a distributed set of algorithm agents capable of competition and/or cooperation and having their own criteria, preferences, and constraints. It is considered the solution is found when, the agents reach consensus (temporary equilibrium or balance of interests).

As an example of the ML approach consider the problem of the choice of optimal channel congestion control. The CWND size is one of the main feature for transmission rate control. If we can accurately foresee the CWND size at a future point in time, we would be no need to use the conservative additive increase strategies, thereby enabling a quicke convergence to the optimal sending rate. It is well known the formula $B \times RTT \geq Cwnd$. Its physical meaning is: limit the congestion window CWND to within the bandwidth-delay product (BDP) so as not to exceed the actual capacity of the network path. So, we need to predict RTT and Bandwidth. Let we have transport connection with known QoS = (B,D,J,L)

How could one ASAP select the window size to suit the current capabilities of the transport connection? Existing methods select the appropriate size; the only question is the number of attempts. Can this be done faster?

The following method based on vector auto regression was developed. Let $X_1, X_2, \ldots, X_\tau$, $\tau \in \mathbb{N}^+$ be the time series at the time $T_1, T_2, \ldots, T_\tau$.

Step 1. Construct a modified empirical distribution function with exponential weighting. For any T_t, $t \le \tau$, $\{X_{t-n+1}, X_{t-n+2}, \ldots, X_t\}$ - observation window size n.

$F^*_{t,n}(x)$ - the empirical distribution function with exponential weighting

For any T_t, $t \le \tau$, $\{X_{t-n+1}, X_{t-n+2}, \ldots, X_t\}$ - observation window size n.

$F^*_{t,n}(x)$ - the empirical distribution function with exponential weighting

$$I(X_{t-n+j} \le x) = \begin{cases} 1, \text{ если } X_{t-n+j} \le x, \\ 0, \text{ если } X_{t-n+j} > x. \end{cases}$$

Step 2. Construct a set of quantiles $\{u_{t,i}, u_{t,i+1}, \ldots, u_{t,m}\}$ for $\{X_{t-n+1}, X_{t-n+2}, \ldots, X_t\}$, $F^*_{t,n}(u_{t,i}) = \alpha_i$, $i = 1, \ldots, m$, where $m -$ number of quantiles, $u_{t,i}$ is modified sample quantile $u_{t,i} = \sup\{x \in \mathbb{R} | \sum_{j=1}^{n} w_j I(X_{t-n+j} \le x) < \alpha_i\}$, $\alpha_i -$ the probability that define the position of the quantile in the modified weighted empirical distribution function.

Step 3. Prediction by the VAR algorithm: Calculate new vector time series for $T_{\tau-n+1}$ to T_τ, combining $\{u_{t,i}, u_{t,i+1}, \ldots, u_{t,m}\}$ with the random variable X_t . $\{(u_{\tau-n+1,i}, u_{\tau-n+1,i+1}, \ldots, u_{\tau-n+1,m}, X_{\tau-n+1}), \ldots, (u_{\tau,i}, u_{\tau,i+1}, \ldots, u_{\tau,m}, X_\tau)\}$

Use the new vector time series in a vector autoregressive model with regression coefficient q_r to calculate the value $X_{\tau+1}$.

The essence of the proposed method is as follows.

1. In the sliding window mode, the time series is supplemented with sample quantiles of the probability distribution characteristics.

a. Sample quantiles are selected as additional features, since they convey objective information about the statistical patterns of the process under consideration. The window width is chosen small enough so that the process conditions within the window can be considered unchanged and at the same time large enough so that the window contains enough statistical data.

b. Sample quantiles are calculated using a modified empirical distribution function, in which the most recent observations are assigned larger weights (here, the Nadaraya-Watsen approach is used). The weights are selected experimentally.

2. Vector auto regression (VAR) is used as a forecasting algorithm. Its order is selected experimentally. The VAR uses matrix inversion and multiplication operations that allow acceleration by GPU. In the future NN methods like LSTM would be tested.

Other example of multi-agent technic with reinforcement learning was developed for data flow balancing. This method was called MAROH and it was published in [3].

Conclusion

Our applications are highly distributed, have dynamic behavior, complex, scalable data flow and control flow topologies, and a wide range of requirements. Computation infrastructure with Computation on Demand (CoD) services must deliver them with deterministic or at least predictable quality of service (QoS). Advances in computing power and data transfer rate are forcing control and management services of next-generation computing infrastructure to operate online. The capabilities of modern mathematical methods of multi-agent optimization and machine learning (ML) open up real opportunities for automating the management and control of computing infrastructure operation online. The examples of ML methods usage for computing infrastructure management and control were demonstrated:

- Two-layer control plane MAROH method is more efficient than known balancing algorithms like ECMP, UCMP and centralized one while reducing number of communications more than 87% comparing with MAROH.
- The congestion window size control mechanism based on the EVAR prediction method allows to increase the transmission rate of a transport connection compared to classical CC methods.
- Both the MAROH method with a two-layer control plane and the EVAL Cwnd prediction method have a number of promising directions for development and improvement.

References:

[1] *Foster and. C. Kesselman*, "The history of the grid," arXiv preprint arXiv:2204.04312 (2022).

[2] *I. Foster and. C. Kesselman*, "The Grid 2: Blueprint for a New Computing Infrastructure" (Elsevier, Amsterdam, 2003).

[3] *R.Smeliansky, E.Stepanov* Machine Learning to Control Network Powered by Computing Infrastructure. ISSN 1064-5624, *Doklady Mathematics*, 2024. © Pleiades Publishing, Ltd., 2024.

[4] *R. Smeliansky*, "Network powered by computing: Next generation of computational infrastructure," in Edge Computing—Technology, *Management and Integration* (IntechOpen, 2023), pp. 47–70.

[5] *R. Smeliansky*, "Evolution of computational infrastructure," *Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics* 2024. 4, pp. 190–233 [in Russian].

[6] *Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. М*. Методы оптимизации. — М.: Наука, 1978. — 352 с.

Алгоритм устойчивой кластеризации RR-LEACH для повышения производительности беспроводных сенсорных сетей

Е. А. Евстифеева
Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,
el_solitario@bk.ru

Аннотация. *Беспроводные сенсорные сети (БСС) используются в различных системах управления, включая мониторинг окружающей среды, домашнюю автоматизацию, нефтяную промышленность и обнаружение химических/биологических атак. БСС представляет собой набор сенсорных узлов и узлов маршрутизации, которые могут быть объединены для прогнозирования физических условий в окружающей среде. Несмотря на многочисленные преимущества такой технологии, истощение емкости батареи сенсора является серьезной проблемой из-за существенных вычислительных и коммуникационных задач, выполняемых отдельными датчиками. Однако БСС часто развертываются в отдаленных районах, где вмешательство человека для обслуживания сети после ее развертывания невозможно. Поэтому прилагаются усилия по повышению эффективности функционирования сети и ее сроку службы. Большая часть исследований сосредоточена на потреблении энергии, что является одним из наиболее важных условий проектирования беспроводных сенсорных сетей. Стратегия кластеризации является одним из наиболее эффективных методов энергосбережения в такой сети с ограниченными энергоресурсами. В данной статье представлен обзор нового алгоритма маршрутизации RR-LEACH, основанного на алгоритме LEACH. Предложенный алгоритм значительно увеличивает срок службы датчиков БСС, что способствует увеличению производительности сети.*

I. Введение

В последнее время Интернет вещей (IoT) стал перспективной технологией из-за применения в различных отраслях, таких как военная отрасль, здравоохранение, управление стихийными бедствиями и других системах наблюдения. На рис. 1 изображена общая архитектура Интернета вещей. Беспроводные сенсорные сети (БСС) широко используются в широком спектре приложений IoT. Интеллектуальные устройства в приложениях БСС с поддержкой IoT подключаются к Интернету через базовую станцию (БС) или шлюзовой маршрутизатор. Таким образом, IoT обеспечивает доступ в режиме реального времени к любому устройству, что приводит к повышению производительности и эффективности функционирования БСС [1].

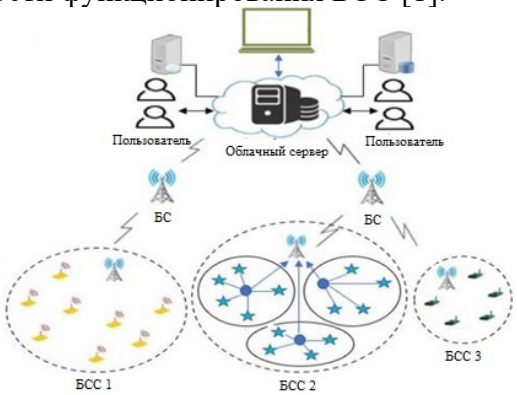


Рис.1. Общая архитектура Интернета вещей

Беспроводная сенсорная сеть — это сеть, которая соединяет виртуальный и физический миры. Беспроводные сенсорные узлы отвечают за зондирование и передачу данных в Интернет. Беспроводные сенсорные узлы используются для мониторинга различных физических и экологических параметров в сетевом поле. Поскольку батарея сенсора не всегда перезаряжаема,

стратегия маршрутизации данных от сенсорного узла к БС должна быть энергоэффективной [2]. В отличие от сети ad-hoc, БСС, разработанная для приложений IoT, сталкивается с рядом проблем, включая количество сенсорных узлов, оборудование, режим связи, батарею и вычислительные затраты. Помимо обнаружения данных, сенсоры, используемые в парадигме IoT, получают дополнительную функциональность, и они должны решать новые проблемы, такие как качество обслуживания, безопасность и управление питанием [3]. Некоторые из этих трудностей решаются путем внедрения различных технологических усовершенствований в примитивные алгоритмы маршрутизации БСС.

II. Алгоритм кластеризации LEACH

LEACH — это базовый алгоритм кластеризации, позволяющий экономить большее количество энергии по сравнению с другими алгоритмами, не использующими кластеризацию. Алгоритм LEACH, являющийся в настоящее время самым популярным энергоэффективным алгоритмом иерархической маршрутизации был предложен исследователем Венди Хейнзельманом [4] для БСС с целью снижения энергопотребления в сети. В LEACH сеть разделяется на несколько кластеров. Работа LEACH управляется через циклы. В каждом цикле работа алгоритма разделяется на два этапа - этап установки и стационарный этап. На этапе установки выбираются головные кластерные узлы (ГУ), создаются кластеры, а затем определяется маршрут соединений между кластерами. В начале, сенсорные узлы выбирают случайное число m между 0 и 1. Если это число m меньше порогового значения T (n), то сенсорный узел становится головным узлом. Поскольку число m выбирается случайным образом, то количество ГУ не может быть постоянным. T (n) рассчитывается по формуле (1), где *p* - желаемый процент головных узлов, *r* - текущий номер цикла и *G* - набор узлов, которые не были головными узлами в последние *1/p* циклов.

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{P}{1 - P\left(r \bmod \dfrac{1}{p}\right)} & \text{если } n \in G \\ 0 & \text{в ином случае} \end{cases} \quad (1)$$

Решение изменить ГУ является вероятностным; возможно, что узел с низким зарядом энергии может быть выбран в качестве ГУ. Когда у такого узла заканчивается заряд энергии, то весь кластер становится нерабочим. После выбора ГУ, каждый головной узел отправляет информацию с помощью множественного доступа с кодовым разделением (CDMA) на другие узлы и рабочие узлы присоединяются к соответствующим головным узлам. Затем ГУ используют множественный доступ с временным разделением (TDMA), чтобы обеспечить время передачи данных для каждого узла, подключенного к ним. На стационарном этапе происходит передача данных, где рабочие узлы собирают данные и отправляют их к соответствующим головным узлам. Обработка полученных данных (агрегация и объединение данных) осуществляется головным узлом и обработанные данные отправляются к БС.

III. Алгоритм RR-LEACH

Рассматриваемый алгоритм RR-LEACH разработан для решения недостатков алгоритма LEACH, а также ограничений прямой передачи. Данный алгоритм использует головные узлы и базовые станции с односкачковой связью. Алгоритм RR-LEACH направлен на улучшение баланса нагрузки в сети с использованием соответствующего алгоритма выбора головного узла. Выбор ГУ основан на остаточной энергии и энергии текущего цикла. Предлагаемый алгоритм представляет собой двухэтапный иерархический метод кластеризации, который включает этапы настройки и стационарного состояния. На этапе первоначальной настройки узлы сенсоров сгруппированы в кластеры. В каждом кластере ГУ отвечает за сбор данных с зондируемой области. Данные объединяются в соответствующем ГУ для экономии пространства путем удаления избыточных битов. Фактическая маршрутизация данных происходит во время этапа стационарного состояния, когда головные узлы сети пересылают собранные данные к базовой станции. Кластеры и ГУ

формируются в первом цикле этапа настройки с использованием обычного метода алгоритма LEACH. Каждый узел в сети затрачивает определенное количество энергии за время передачи данных, которое варьируется от узла к узлу. Количество затраченной энергии связано с расстоянием между отправляющим и принимающим узлами. Поэтому для следующего цикла выбор головного узла проверяется с использованием модифицированного уравнения

$$T(n) = \begin{cases} a\frac{P}{1-P\left(r \bmod \frac{1}{p}\right)}(1-\beta)K_{opt}\text{, если } n \in G \\ 0, \quad \text{в ином случае} \end{cases} \quad (2)$$

где $\alpha=\frac{E_{res}^{ri}}{E_0}$ и $\beta=\frac{E_{round}^{ri}}{E_{res}}$. Оптимальное число кластеров K_{opt} может быть найдено по формуле (3):

$$K_{opt} = \frac{\sqrt{n}}{2\pi}\sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{amp}d^4(2m-1)E_0 - mE_{DA}}}M \quad (3)$$

В формуле (3) n – общее число сенсоров БСС, m – число кластеров, M – диаметр сети, E_0 - начальный уровень энергии, E_{res} – оставшийся уровень энергии узла, E_{round} – энергия, потребляемая выбранным ГУ. Остаточная энергия выбранного ГУ проверяется в каждом цикле после выбора узла с высоким уровнем энергии в качестве головного. Выбранный ГУ продолжит работу как головной, если оставшаяся энергия больше энергии текущего цикла; в ином случае он будет назначен членом кластера. Это позволяет сети избежать слишком быстрого истощения. Рассматриваемый алгоритм включает в себя концепцию кластеризации, а также периодические оценки уровня энергии в каждом цикле, что приводит к повышению надежности сети. Таким образом, алгоритм RR-LEACH может не только продлить срок службы БСС, но и сбалансировать энергию между сенсорными узлами сети.

IV. Заключение

В данной статье рассмотрен алгоритм устойчивой маршрутизации RR-LEACH, разработанный для более устойчивой и оптимальной работы беспроводных сенсорных сетей в ряде интеллектуальных приложений IoT. Предлагаемый алгоритм направлен на устранение ограничений LEACH путем введения кластерного алгоритма маршрутизации на основе остаточной энергии и регулярной оценки энергии каждого раунда. Согласно результатам анализа производительности, RR-LEACH превосходит существующие алгоритмы по срокам службы сети, стабильности и скорости истощения остаточной энергии узлов. В результате производительность сети улучшилась по сравнению с различными существующими подходами.

Литература

[1] *Patrick, O. K., Emmanuel, N., & Thomas, D.* Architecture for an efficient integration of wireless sensor networks to the Internet through Internet of Things gateways. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(1 1), 1 -13, 2017.

[2] *Zahid, Y., Intesab, H., Soufiene, D., & Yassine, H. A.* A Novel Energy-Efficient Clustering Algorithm for More Sustainable Wireless Sensor Networks Enabled Smart Cities Applications. *J. Sens. Actuator Netw*, 10(3), 2021.

[3] *CHRYSI, K. M., KOSTAS, E. P., & EUGENIA, A. E.* Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches. IEEE Access, vol.8, 2020.

[4] *Heinzelman. W.R.,Chandrakasan:* A, “Energy efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: IEEE ComputerSociety Proceedings, Vol. 8, pp. 10-20, 2000

Robotic aspects and intelligent navigation of medical instruments in invasive procedures

O. M. Gerget, T. G. Naumchik
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia,
olgagerget@mail.ru, tatiananaumchik03@mail.ru

Abstract. *This paper presents the concept of a robotic platform for the precise delivery of medical instruments during minimally invasive interventions, with a particular focus on transcatheter aortic valve replacement (TAVR). The system is based on a two-module architecture comprising a high-precision main platform with linear and rotary drives, as well as an instrument module capable of automatically controlling different types of catheters.*
The medical instrument is modelled as a flexible continuous robot with variable curvature. For this model, a method for solving the inverse kinematics problem has been developed using virtual rigid links, along with an adapted FABRIKx algorithm. Control relies on feedback from a visual guidance module. The visual system addresses the tasks of anatomical structure and instrument segmentation, as well as key-point tracking, employing neural network models: U-Net++ and DeepLabV3+ for segmentation, ResNet34 and ResNet18+LSTM for tracking. Training was carried out on real angiographic data from 81 patients.
Experimental results demonstrated that DeepLabV3+ and U-Net++ achieved the best performance on the Dice Similarity Coefficient (0.881), providing high accuracy with moderate computational cost. For the key-point tracking task, ResNet34 reached 92% precision and 96% recall, while the ResNet18+LSTM hybrid achieved 0.97 accuracy at processing speeds exceeding 50 frames per second.

I. Introduction

The development of modern medical technologies has intensified the demand for automated medical image analysis systems. The automation of minimally invasive procedures—such as transcatheter aortic valve replacement (TAVR)—remains challenging due to the lack of models that are both accurate and fast enough to describe catheter behaviour inside anatomical structures, and the absence of effective methods for robotic motion control in a dynamic environment (breathing, cardiac motion).

These issues can be partially addressed by: developing an inverse kinematics solution for medical instruments, modelled as flexible continuous robots with variable curvature and a linearly displaceable base; creating a visual guidance system incorporating models for anatomical structure segmentation and key-point tracking; designing a robotic instrument-delivery platform with integrated intelligent information processing.

Accurate robotic control requires reliable and rapid feedback from advanced medical image processing techniques. Segmentation of anatomical structures is therefore a key computer vision task, critical for both diagnosis and intraoperative navigation. This is especially relevant in TAVR, a minimally invasive method for treating severe aortic stenosis in high-risk patients [1].

Traditional 2D fluoroscopy does not provide depth information and suffers from structural overlap, increasing the risk of error and radiation exposure. Hence, intelligent systems capable of real-time detection of anatomical landmarks and instruments are needed. Deep learning methods, particularly convolutional neural networks (CNNs), have greatly improved segmentation accuracy and robustness even in low-contrast, noisy conditions. Such methods enhance valve positioning, reduce contrast agent use, and increase procedural safety.

II. Concept and design of the robotic platform

Based on TAVR requirements, a robotic platform was developed to enable controlled insertion, withdrawal, and manipulation of catheters.

The platform comprises two main modules:

1. Main platform. Includes a linear drive module enabling translational movement of up to 1.5 m (PL 40STB-M00330 motor) and a rotary mechanism allowing 270° rotation of the instrument module around the motion axis. A single-component load cell ensures load monitoring—an essential safety feature. Multiple hardware and software redundancies (controllers, data buses, power supply) are incorporated. A proprietary parallel data bus with redundancy coding and majority-decision control of terminal nodes increases system reliability. The system is capable of self-diagnostics and autonomous position control.

2. Instrument module. Designed for rapid tool exchange and automatic control of various commercial devices (balloon catheters, valve catheters). Reverse engineering was used for accurate design. Catheters are modelled as continuous robots with piecewise constant curvature. A parameter-determination method was developed to minimise the error between theoretical workspace predictions and experimental data using a lattice search approach. An inverse kinematics method based on representing each bending section as a virtual rigid link was proposed. For multi-section continuous robots, the FABRIKx algorithm was adapted, achieving up to 60% higher success in solving inverse kinematics compared to the Jacobian matrix approach.

III. Neural network architectures for anatomical segmentation

Segmentation of structures such as the aortic root is complicated by low contrast and noise in intraoperative images [2]. Six CNN architectures were evaluated: U-Net++, DeepLabV3+, FPN, LinkNet, MA-Net, and PSPNet.

U-Net++ and DeepLabV3+ demonstrated the best balance of accuracy and stability (median DSC = 0.881). LinkNet and MA-Net achieved comparable results (DSC ≈ 0.877–0.878) with lower computational cost, making them suitable for real-time use. FPN achieved a peak DSC of 0.916 but with high variability, while PSPNet showed instability (DSC = 0.854).

As a result, DeepLabV3+ and U-Net++ can be considered the most promising approaches for aortic root segmentation, as they combine high accuracy, robustness, and computational efficiency, making them well-suited for integration into intraoperative visual guidance systems.

IV. Key-point tracking with group correlation

A promising direction for visual support in TAVR is a multi-level key-point tracking algorithm based on group landmark structures. Unlike traditional methods, it accounts for point interrelations and joint appearance, improving model stability and interpretability [3].

The task is formulated within the framework of multitask learning, where both the visibility and the (x, y) coordinates are predicted for each key point. All landmarks are divided into three groups: anatomical, instrumental, and contour. If a group is absent, its key points are marked as invisible, which reduces false detections.

The architecture employs hard parameter sharing: a shared feature extractor (ResNet18/34/50, VGG16, EfficientNet-B7) feeds into specialised output blocks for classification and coordinate regression.

The loss function combines three components: BCE Loss (group classification), Focal Loss ($\alpha = 0.25$, $\gamma = 2$, class balancing), and Wing Loss (coordinate regression).

Optimisation is performed end-to-end, and during inference the system outputs the coordinates of landmarks exceeding a probability threshold. This ensures stable real-time tracking and makes the approach suitable for intraoperative TAVR systems.

V. Data and experimental results

Clinical data from 81 TAVR patients with severe aortic stenosis were used, comprising 2,854 intraoperative angiographic images (1000×1000 px, 8-bit). Data were anonymised; 87% used for training and 13% for testing. For key-point tracking, video sequences from the Aortography Keypoint Tracking for TAVI dataset were used. Training was carried out with the Adam optimiser, L2 regularisation ($1e^{-4}$), polynomial learning rate decay, a batch size of 12, and standard data augmentations.

DeepLabV3+ and U-Net++ achieved the best segmentation results (DSC = 0.881) with stable convergence after 10–15 epochs. LinkNet and MA-Net showed comparable accuracy (DSC ≈ 0.877–0.878)

at lower computational cost. FPN peaked at 0.916 but was highly variable; PSPNet was unstable (DSC = 0.854).

For key-point tracking, ResNet34 achieved Precision 92.3%, Recall 96.0%, F1-score 93.3%, with an average error of 25.6 pixels. ResNet18 provided similar results with reduced cost. The ResNet18+LSTM hybrid improved stability (Accuracy = 0.97) and achieved >50 fps. These findings confirm the potential of CNN-based architectures for intelligent TAVR navigation.

Catheter motion experiments, including tests with a vascular phantom, validated the control model. Comparison with simulations showed an average coordinate error of 4.5 ± 3.5 mm. The average error between initial data (manual labels) and simulation was 1 ± 1 mm, confirming successful model verification.

Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project «Science FSWW-2023-0007».

VII. Conclusion

The proposed robotic complex, integrating a mechanical platform with an intelligent visual guidance system, offers a comprehensive solution for TAVR automation. The developed FABRIKx algorithm ensured highly efficient positioning, confirmed experimentally. The integration of visual feedback based on neural network segmentation (DeepLabV3+, U-Net++) and tracking (ResNet34, ResNet18+LSTM) algorithms provided the robotic platform with a complete control loop for operation in a dynamic anatomical environment.

References

[1] *M. Bianchi, R. P. Ghosh, G. Marom, M. J. Slepian, and D. Bluestein*, "Simulation of Transcatheter Aortic Valve Replacement in patientspecific aortic roots: Effect of crimping and positioning on device performance," 2015 *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC),* Milan, Italy, 2015, pp. 282-285, doi: 10.1109/EMBC.2015.7318355.

[2] V. *V. Danilov, K. Y. Klyshnikov, O. M. Gerget, I. P. Skirnevsky, A. G. Kutikhin, A. A. Shilov, V. I. Ganyukov, and E. A. Ovcharenko*, "Aortography Keypoint Tracking for Transcatheter Aortic Valve Implantation Based on Multi-Task Learning," *Front Cardiovasc Med*., vol. 8, Jul. 2021, Art. no. 697737, doi: 10.3389/fcvm.2021.697737.

[3] *V. V. Laptev and N. A. Kochergin*, "Application of object detection technology in the task of detecting key points in aortography," *Complex Problems of Cardiovascular Diseases*, vol. 13, no. 1, pp. 144-151, 2024. doi: 10.17802/2306-1278-2024-13

Секция 3

Цифровые экосистемы, управление производством и логистикой

Digital ecosystems, production and logistics management

Человекоцентричные архитектуры киберфизических производственных систем на основе цифровых двойников

М. В. Зенькович
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия,
mvz04@yandex.ru

***Аннотация**. В работе обсуждаются проблемы проектирования человекоцентричных архитектур киберфизических производственных систем (КФПС) на основе цифровых двойников. Представлены концептуальные модели архитектур КФПС, с применением цифровых двойников, организованные в соответствии с основными постулатами концепций Индустрия 4.0 и Индустрия 5.0. В рамках обсуждаемого подхода цифровые представления различных элементов (как технических компонент КФПС, так и операторов производственных систем (ПС)) социо-киберфизической ПС рассматриваются в качестве агентов, функционирующих в рамках мультиагентной системы (собственно социо-киберфизической ПС). Для моделирования КФПС предлагается применение концепции адаптивного цифрового двойника ПС, основанного на адаптивной мультиагентной имитационной модели. Состав элементов адаптивной мультиагентной имитационной модели не ограничен цифровыми двойниками технических компонент, их дополняют цифровые двойники операторов ПС. Упомянутая особенность обеспечивает человекоцентричность архитектуры КФПС. Цифровые представления операторов ПС реализованы на основе модифицированной концепции интеллектуального эмоционально-мотивированного агента. Разработан программный прототип адаптивного цифрового двойника, предназначенный для решения ряда задач на стадии проектирования КФПС. Параметризация агентов, моделирующих действия операторов ПС, осуществлена на основе обработки и анализа результатов тестирований операторов аналогичных систем и экспертных оценок.*

I. Введение

При проектировании современных высокотехнологичных производств, главным образом, руководствуются концепцией Индустрия 4.0. Индустрия 4.0 в основном ориентирована на глобальную автоматизацию всех элементов и процессов высокотехнологичных производств и является в определенной степени «системоцентричной (техноцентричной)» [1]. Среди основных отличительных черт производственных систем (ПС), организованных в соответствии с концепцией Индустрия 4.0, можно отметить замещение физических элементов ПС киберфизическими. Упомянутая особенность обусловила трансформацию традиционных ПС в киберфизические производственные системы (КФПС), что позволило в существенной мере обеспечить повышение эффективности, управляемости и устойчивости, как для отдельных производственных элементов, так и для всего производственного комплекса и послужило фундаментальной базой для организации «умных» производств. Несмотря на наличие многочисленных примеров высокоэффективных производств, построенных на основе постулатов Индустрии 4.0, нельзя не отметить наличие некоторых недостатков у упомянутой концепции. В частности в рамках концепции недостаточное внимание уделяется роли человеческого фактора в управлении производственными процессами и системами. Упомянутое обстоятельство послужило одной из предпосылок к разработке концепции Индустрия 5.0, одним из фундаментальных постулатов которой является «человекоцентричность». Однако следует отметить, что и ранее делались попытки в определенной степени нивелировать этот недостаток. Так, еще на основе Индустрии 4.0, была предложена концепция Оператор 4.0 (*Operator* 4.0) [2], ее появление было обусловлено необходимостью обеспечения КФПС и «умных» производств персоналом, способным эффективно взаимодействовать с высокотехнологичным оборудованием новых поколений и обеспечивать стабильные условия для его функционирования, что налагает на персонал высокие требования в т.ч. и квалификационные. Согласно концепции для

дальнейшего обеспечения повышения эффективности, управляемости и устойчивости на производстве предлагается организовать «симбиоз» высококвалифицированных операторов и КФПС, что позволит в дальнейшем трансформировать КФПС в социо-киберфизические производственные системы [2]. В ходе производственного процесса предлагается отслеживать различные биометрические показатели, позволяющие в реальном времени осуществлять оценку физического, эмоционального и психологического состояний операторов, с целью составления гибких сменных графиков, позволяющих предотвращать переутомляемость персонала и существенно сократить количество нештатных ситуаций на производстве, возникших под влиянием человеческого фактора [1], [2]. Упомянутые ранее концепция Индустрия 5.0 и человекоцентричность послужили предпосылками к возникновению концепции Оператор 5.0 (*Operator* 5.0), дополняющей концепцию Оператор 4.0 в соответствии с постулатами Индустрии 5.0 [2]. В настоящей работе для обеспечения человекоцентричности КФПС предлагается, в архитектурах КФПС, в дополнении к цифровым двойникам ПС и их элементов, применять цифровые двойники операторов ПС.

II. Концептуальные модели архитектур КФПС с применением цифровых двойников

Цифровой двойник – высокоэффективный инструмент, широко применяемый в КФПС, организованных в соответствии с основными постулатами концепций Индустрия 4.0 и Индустрия 5.0. Концептуальные модели архитектур КФПС с применением цифровых двойников представлены на Рис. 1.

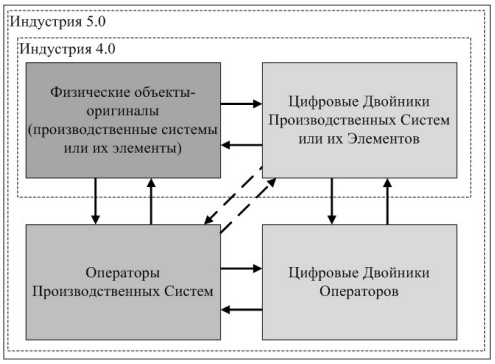


Рис.1. Концептуальные модели архитектур КФПС,
с применением цифровых двойников, организованные в соответствии
с основными постулатами концепций Индустрия 4.0 и Индустрия 5.0

Рассматриваемый подход позволяет спроектировать экосистему, для промышленной автоматизации, позволяющую решать не только классические задачи управления сложными техническими системами, но и учитывать различные аспекты, касающиеся взаимодействий операторов и технических систем. В рамках обсуждаемого подхода цифровые представления различных элементов (как технических компонент ПС, так и операторов ПС) социо-киберфизической ПС рассматриваются в качестве агентов, функционирующих в рамках мультиагентной системы (собственно социо-киберфизической ПС). Для моделирования КФПС предлагается применение концепции адаптивного цифрового двойника ПС. В работах [3], [4], [5] под адаптивным цифровым двойником ПС понимается цифровой двойник, который, реагируя на изменение параметров и состояния объекта-оригинала, а также на воздействия внешней среды, изменяет свое состояние и структуру адаптивной мультиагентной имитационной модели (подсистема адаптивного цифрового двойника) [3], [4], [5]. Под изменением структуры понимается динамическое добавление (удаление) элементов, с соответствующим изменением операторов сопряжения. Операторы сопряжения элементов можно модифицировать на основе интеграции методов имитационного моделирования и машинного обучения (обучение с подкреплением) [3], [4], [5]. В рассматриваемых условиях, состав элементов адаптивной мультиагентной модели не ограничен цифровыми двойниками технических компонент, их дополняют цифровые двойники операторов ПС. Упомянутая особенность обеспечивает человекоцентричность архитектуры КФПС.

При разработке человекоцентричных архитектур КФПС на основе цифровых двойников особенно критичен вопрос реализации цифровых представлений операторов ПС.

III. Цифровые двойники операторов ПС

При реализации цифровых представлений операторов ПС можно воспользоваться концепцией интеллектуальных эмоционально-мотивированных агентов [6], с некоторыми расширениями и дополнениями. Основываясь на упомянутой концепции, рассмотрим следующее параметрическое описание агента *AOp*, моделирующего оператора ПС, в виде кортежа: $AOp = < Co, Em, Ph, So >$, где *Co* – параметры когнитивного состояния агента; *Em* – параметры эмоционального состояния; *Ph* – параметры физического состояния; *So* – параметры социального состояния и персональные характеристики. Значения соответствующих параметров можно получить как на основе обработки результатов тестирования операторов ПС [6], [7] и исторических массивов данных характеризующих состояния операторов в процессе выполнения служебных обязанностей, так и на основе отслеживания некоторых параметров характеризующих состояния операторов в реальном времени. Хотя подход к параметризации агентов, на основе сбора и отслеживания параметров, характеризующих состояния операторов в реальном времени является предпочтительным, для его имплементации требуется наличие соответствующей инфраструктуры, что существенно осложняет реализацию упомянутого подхода на стадии проектирования КФПС, поэтому для параметризации агентов используются результаты тестирований операторов аналогичных систем и экспертные оценки.

IV. Заключение

В рамках обсуждаемого подхода цифровые представления различных элементов социо-киберфизической ПС рассматриваются в качестве агентов, функционирующих в рамках мультиагентной системы. Для моделирования КФПС предлагается применение концепции адаптивного цифрового двойника ПС, основанного на адаптивной мультиагентной имитационной модели. Состав элементов адаптивной мультиагентной имитационной модели не ограничен цифровыми двойниками технических компонент ПС, их дополняют цифровые двойники операторов ПС. Упомянутая особенность обеспечивает человекоцентричность архитектуры КФПС. При реализации цифровых представлений операторов ПС применялась концепция интеллектуального эмоционально-мотивированного агента, с некоторыми расширениями и дополнениями. Разработан программный прототип адаптивного цифрового двойника, предназначенный для решения ряда задач на стадии проектирования КФПС. Параметризация агентов, моделирующих действия операторов ПС, осуществлена на основе обработки и анализа результатов тестирований операторов аналогичных систем и экспертных оценок.

Литература

[1] *B. Gaffinet* et al., “Human Digital Twins: A systematic literature review and concept disambiguation for industry 5.0,” Computers in Industry, Volume 166, 2025, art. 104230.

[2] *B. Gladysz* et al., “Current development on the Operator 4.0 and transition towards the Operator 5.0: A systematic literature review in light of Industry 5.0,” Journal of Manufacturing Systems, Volume 70, 2023, pp. 160–185.

[3] *Зенькович М.В., Древс Ю.Г.* Применение цифровых двойников производственных систем в адаптивных системах управления крупномасштабными производствами // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. Труды тринадцатой международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 1507–1516.

[4] *Зенькович М.В., Древс Ю.Г., Иноземцева В.С.* Адаптивные цифровые двойники в задачах управления высокотехнологичными производствами // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024). Сборник научных трудов. – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1844–1848.

[5] *M.V. Zenkovich*, “Digital Twin-Driven Decision-Making Support Approach in Adaptive Control of Production Systems,” 2025 International Russian Smart Industry Conference, 2025, pp. 1130–1135.

[6] *Ивашкин Ю.А.* Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 361 с.

[7] *Кулик С.Д.* Метод последовательного анализа для тестирования человека-оператора // Прикладная информатика. 2015. № 3 (57). – С. 100–108.

Разработка маршрутной технологии изготовления изделий распределенного приборостроительного производства

М. В. Пономаренко, Ю. С. Андреев, И. А. Волков
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия,
ponomarenko.mx@gmail.com

***Аннотация**. В работе обозначены ключевые проблемы при создании маршрута изготовления детали при технологической подготовке производства (ТПП). Предложен метод формирования маршрута обработки с учетом текущих и плановых возможностей оборудования и формирование оптимальной последовательности операций за счет применения интеллектуальной системы управления ресурсами предприятия.*

I. Введение

Правительство РФ ставит амбициозные задачи по развитию высокотехнологичных отраслей, куда входят 4 группы: авиационная промышленность и двигателестроение, ракетно-космическая промышленность, атомный энергопромышленный комплекс, судостроительная промышленность [1, 2]. Каждая из указанных высокотехнологичных отраслей транслируют требования к объему и качеству продукции приборостроительной и электронной промышленности. Согласно стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года основным проблемным вопросом производственно-технологического характера в отрасли остается дефицит современного российского производственного, контрольно-измерительного и испытательного оборудования. В связи с политикой западных стран и введенными санкциями у отечественных предприятий существенно ограничиваются возможности закупки нового оборудования, что влияет на возможность наращивать свои производственные мощности за счет закупки нового современного оборудования, а усиливающаяся нехватка квалифицированного персонала найма дополнительных работников только усложняет данную ситуацию.

Высокий уровень технологической подготовки производства (ТПП) является условием эффективной работы производства любого типа (единичного, серийного, массового), обеспечивая его стабильность и надежность функционирования, гибкость и способность к адаптации [3].

Одним из этапов ТПП является разработка технологом маршрута изготовления изделий и назначение операций обработки заготовок. Если для средне- и крупносерийных производств для описания технологического процесса (ТП) имеет целесообразность применять маршрутно-операционное и операционное описание ТП, то для дискретных и мелкосерийных производств в виду высокой трудоемкости такого описания чаще всего ограничиваются маршрутным описанием ТП [4].

Под технологическим маршрутом изготовления детали понимается последовательность выполнения технологических операций с выбором типа оборудования. Рациональный маршрут выбирают с использованием справочных данных и руководящих материалов по типовым и групповым методам обработки. При написании технологического маршрута технологу необходимы данные об оборудовании, которые помогут определить оптимальный способ обработки заготовки и рассчитать необходимые ресурсы. Это включает в себя информацию о типах и моделях станков, их технических характеристиках, возможностях и ограничениях, а также данные о применяемых приспособлениях, инструментах и средствах измерения [5]. В приборостроении важнейшим показателем является точность изготовления деталей [6], на которое влияет множество факторов такие как износ оборудования и нестабильность режимов обработки, которые не удается хранить в виде справочников. Важно прогнозировать качество изготовления изделия в зависимости от выбранного оборудования на основе реальных данных поступающих непосредственно с

контроллеров, а современные научные разработки в области машинного обучения позволяют этот процесс автоматизировать [7].

II. Описание предлагаемого метода назначения технологических режимов литья

В настоящее время технолог, создавая маршрут изготовления детали, опирается на статичные данные, а уточнение состояния и доступности оборудования, оснастки и т.д. происходит на уровне цеха, когда заказ на изготовление поступает непосредственно в планово-диспетчерский отдел (ПДО) или непосредственно мастеру. На этом этапе выясняется, что некоторые единицы оборудования или не в состоянии выполнить указанные требования по качеству, или недоступны из-за загрузки другими работами. Непосредственно в цехе принимаются решения об изменении используемого оборудования, какие-то работы отдаются на кооперацию, что ведет к изменению плановой себестоимости изготовления и сроков. Процесс может состоять из множества итераций, что увеличивает как длительность процесса, так и трудоемкость ТПП, что в конечном итоге ведет к снижению экономической эффективности предприятия и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Также современные приборостроительные предприятия могут иметь распределенную структуру производственных площадок, т.е. отдельные участки, цехи, оборудование может находиться на значительном удалении друг от друга, что выдвигает новые требования к времени на логистику при ТПП и оперативно-производственное планирование (ОПП) [8].

В рамках исследования предлагается описанные выше задачи ПДО и мастеров цехов решать на этапах ТПП за счет автоматизации этих процессов и построения системы автоматизированного управления подготовки (САУП) производства, которая включает в себя подсистему ОПП. Именно данная подсистема решает задачу организации согласованного во времени и в маршрутно-технологически организованном пространстве (цехи, участки, линии и рабочие места) движение изделий и их частей. Критериями достижения указанной цели и корректности работы подсистемы ОПП являются: рациональное использование оборудования, оснащения, трудовых ресурсов, производственных площадей с учётом возможности повышения производительности производства и минимальное связывание оборотных средств в незавершенном производстве с соблюдением плановых сроков выпуска продукции.

В работе предлагается новая методика разработки маршрута изготовления изделия с учетом особенностей распределённого производства, а также получения данных с оборудования и различных информационных производственных систем в режиме реального времени. Для этого предлагается использовать комбинацию из 3х основных методов:

1. разработка и планирования маршрута изготовления по критическому пути, который предполагает выявление в хронологии изготовления заказа самых важных работ, определение зависимостей между ними и расчёт времени, необходимого для их выполнения;

2. автоматизированный подбор альтернативных маршрутов за счет применения мультиагентных систем (МАС) и онтологического описания взаимодействия агентов потребителей и ресурсов, сравнение с маршрутом по критическому пути;

3. использование динамический подсказок во время ручного ввода элементов маршрута о состоянии оборудования в настоящее время и в будущем с учетом других параметров (стоимость, состояние оборудования, % брака и т.д.).

Данные методы используются в комбинации, что позволяет на этапе выбора оборудования определять наиболее подходящий маршрут изготовления с учетом планов и технического состояния станочного парка, а также задавать критерии оптимальности маршрута.

Метод разработки и планирования маршрута изготовления состоит из последовательности этапов:

1. Декомпозиция партии деталь-сборочных единиц (ПДСЕ) на группы опережения (ГО) или по алгоритму MRP и определение длительности производственного цикла ЭМ (ДПЦ ЭМ) и ДПЦ ДСЕ.

2. Определение критического пути изготовления для изделия или ПДСЕ.

3. Определение критических ресурсов (узкие места) производства.

4. Определение критериев оптимальности.

Последовательность действий (рис. 1) технолога при создании оптимального маршрута изготовления изделия и формирования сбалансированного плана являются 1 этапом комплексного подхода по автоматизации ТПП с использованием ИСУР.

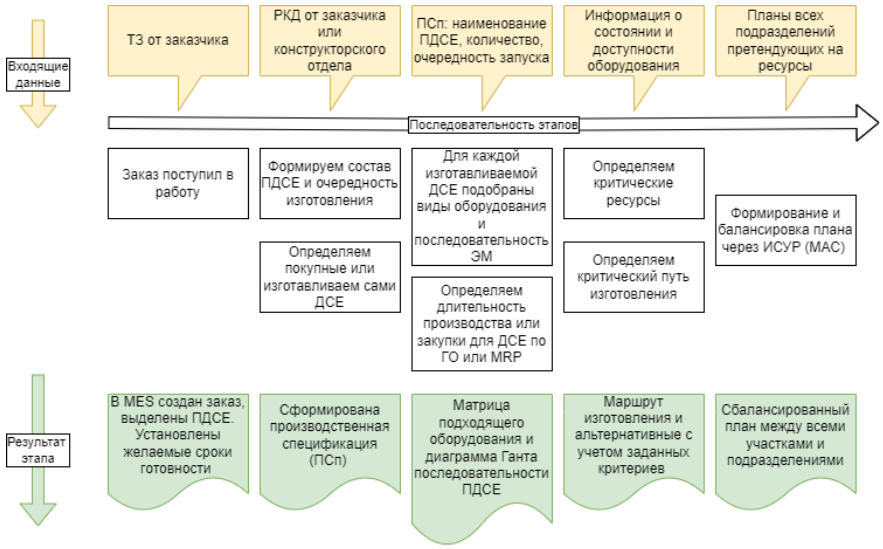


Рис. 1. Последовательность этапов создания оптимального маршрута

III. Заключение

Предложенная методика позволяет перенести выбор оптимального маршрута изготовления с этапа производства на этап ТПП, передав задачу технологам за счет автоматизации данного процесса, используя данные с уровня MES системы в АРМ технолога системы CAPP.

Литература

[1] Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 N 1663-р (ред. от 14.12.2009) «Об утверждении основных направлений деятельности Правительства РФ на период до 2012 года и перечня проектов по их реализации» от 17.11.2008 № N 1663-р // Российская газета

[2] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.08.2023 № 2259-р «Утвердить прилагаемые изменения, которые вносятся в комплексную программу развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года, утвержденную распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 июня 2022 г. № 1693-р (Собрание законодательства Российской Федерации, 2022, № 27, ст. 4877; 2023, № 12, ст. 2056).»

[3] Роль и стадии технологической подготовки производства в повышении эффективности работы предприятия // Новости науки и образования URL: https://kazedu.com/referat/59557/1 (дата обращения: 18.02.2025).

[4] *Хрусталева И. Н., Любомудров С. А., Романов П. И.* Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства //*Глобальная энергия*. – 2018. – Т. 24. – №. 1. – С. 113-121.

[5] Разработка технологической карты // Центр сертификации Ростест Урал URL: *https://rostestural.com/texnicheskaya-dokumentaciya/razrabotka-tehnologicheskoj-karty/#* (дата обращения: 18.05.2025).

[6] *Зерний Ю.В.* Управление качеством в приборостроении. // Учебное пособие. 2010.

[7] *Volkov I., Andreev Y.* Application of Machine Learning Methods for Production Data Analysis //*2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. – IEEE, 2025. – С. 984-989.

[8] *Basova T. V., Andreev Y. S.* Maintenance of Operable Condition of a Flexible Production System Through the Development and Implementation of a Method for Cutting Tools and Workpieces Operational Control //*2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. – IEEE, 2024. – С. 488-493.

Применение прецедентного подхода для назначения технологических режимов при изготовлении полимерных изделий методом литья под давлением

А. В. Чукичев, Ю. С. Андреев
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия,
avchukichev@itmo.ru

***Аннотация**. В данной работе предлагается метод назначения технологических режимов литья под давлением позволяющий повысить эффективность технологической подготовки производства полимерных изделий. В работе предлагается использовать прецедентный подход (Case-Based Reasoning, CBR), основанный на поиске аналогичных решений в базе данных ранее изготовленных деталей. Ключевым отличием предлагаемого метода является использование функции давления материала в точке впрыска от времени, полученной с помощью CAE-моделирования, в качестве основного критерия схожести деталей.*

I. Введение

Одним из основных методов изготовления деталей из пластмасс является литье под давлением. При технологической подготовке производства (ТПП) для литья под давлением полимерных изделий, проектирование оснастки и разработка технологического процесса зачастую занимает больше времени, чем непосредственно их изготовление, что является сдерживающим фактором для применения данного метода в мелкосерийном и единичном производстве. Для быстрого выполнения заказов необходимо повышать эффективность ТПП, поэтому исследования по разработке методов сокращения длительности ТПП являются актуальными. Назначение технологических режимов при этом является ключевым этапом ТПП, влияющим на качество получаемых изделий и длительность наладки оборудования. В связи с этим целью работы является разработка нового метода по назначению технологических режимов при изготовлении полимерных изделий методом литья под давлением с целью повышения эффективности технологической подготовки производства

В настоящее время существует множество исследований на тему применения интеллектуальных подходов в технологической подготовке производства [1], таких как экспертные системы на основе знаний и нечеткой логики, системы на основе нейронных сетей и системы, использующие подход рассуждений на основе прецедентов.

Тем не менее применение таких подходов в реальных условиях ограничено. Так, например, системы на основе нейронных сетей могут использоваться практически в любой области для выполнения конкретных задач [2]. Однако из-за недостатков, связанных с необходимостью формирования большого датасета для их обучения и сложностью переобучения, исследования по применения данного метода в технологической подготовке литьевого производства рассматривают в основном только с точки зрения оптимизации режимов литья и выявления дефектов. Экспертные системы опираются на знания о человеческом опыте в виде правил или нечетких отношений. Такие системы как правило применяются для изменения параметров процесса литья при возникновении дефектов. Однако, знания и опыт о технологических процессах представляют собой большое изобилие и их сложно формализовать в виде простых правил или моделей.

В различных работах прецедентный подход (или Case-Based Reasoning, CBR – рассуждения на основе прецедентов) предлагалось применять на этапах ТПП литья [3]. Подход рассуждений на основе прецедентов является эффективным методом определения параметров как процесса литья, так и параметров литниковой системы, за счет использования имеющихся решений, служащих в качестве базы для решения новых проблем. CBR подходит для определения набора параметров литниковой системы формы и начальных значений режимов литья, которые могут быть в дальнейшем оптимизированы.

В результате анализа достоинств и недостатков интеллектуальных систем [4], в данной работе предлагается применить CBR-подход для решения задач технологической подготовки литьевого производства.

II. Описание предлагаемого метода назначения технологических режимов литья

Основное предположение в CBR заключается в том, что схожие задачи имеют аналогичные решения. Таким образом, учитывая описание новой задачи (новая деталь, целевой случай) и набор параметров, которые ее определяют, из базы прецедентов извлекается одна или несколько похожих деталей (исходные случаи), и решения задач адаптируются к новой. На рисунке 1 представлены основные этапы CBR-подхода.

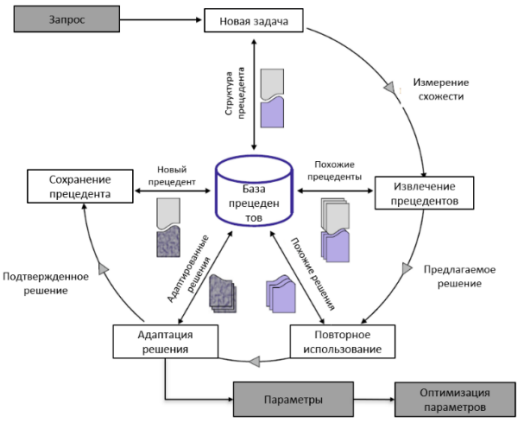


Рис.1. Этапы CBR-подхода

База прецедентов должна содержать все параметры, используемые в процессе проектирования литьевой оснастки и наладки литья под давлением, а также исходные данные об изготавливаемых изделиях, влияющих на их выбор (в частности, геометрические характеристики изготавливаемой детали, физические свойства материала, параметры заказа и т.д.). Запрос для подбора режимов литья для нового изделия формируется на основе структуры базы прецедентов. В ходе работы был проведен анализ исходных данных, используемых технологами на данном этапе ТПП, и технологических режимов, необходимых для наладки оборудования. Для базы прецедентов предлагается использовать фреймовое представление данных о деталях и технологических процессах.

Поиск и сопоставление нового запроса относится к процессу вычисления и сравнения сходства между новым изделием и прецедентами. Для вычисления коэффициента схожести при выполнении задачи назначения литьевых режимов в существующих исследованиях преимущественно используют набор параметров литьевой формы, таких как габариты и форма литниковой полости, расположение и размер полости, и другие характеристики. Очевидно, что такой подход содержит множество поисковых индексов и атрибутов высокой размерности. Кроме того, недостаточно использовать только функцию "геометрия формы", поскольку фактический процесс зависит от параметров свойств пластика и производительности машины.

В данной работе для задачи сравнения деталей предлагается использовать функцию давления материала в точке впрыска от времени в процессе заполнения формы. При установленных свойствах материала, температуры расплава и скорости впрыска перепады давления в точке впрыска хорошо отражают геометрию формообразующей полости, поскольку сопротивление потоку расплава, обусловленное геометрической формой полости литьевой формы, будет отражаться на давлении в точке впрыска.

Таким образом предлагаемый метод назначения технологических режимов литья под давлением на основе CBR можно представить в виде следующих этапов:

1) формирование запроса на основе исходных данных о новом изделии;

2) формирование графиков функции давления в точке впрыска с использованием CAE-системы;

3) предварительная обработка данных с целью интерполяции функции давления и приведения данных к единому шагу по параметру времени заполнения формы;

4) поиск с учетом материала изделия и извлечение прецедентов с установленным пороговым значением коэффициента схожести (0,95);

5) адаптация режимов литья извлеченных прецедентов к применению их на новом изделии;

6) апробация полученных режимов литья.

III. Результаты и обсуждение

В ходе работы была проанализирована выборка из 600 деталей, изготавливаемых на приборостроительном предприятии методом литья под давлением.

В результате работы были сформированы профили давления в точке впрыска для группы деталей с использованием CAE-системы Moldex 3D (CoreTech). Извлечение данных анализа для их дальнейшей обработки выполнялось с помощью парсера, реализованного на языке Python. На рисунке 2 представлен пример такого профиля для одной из деталей.

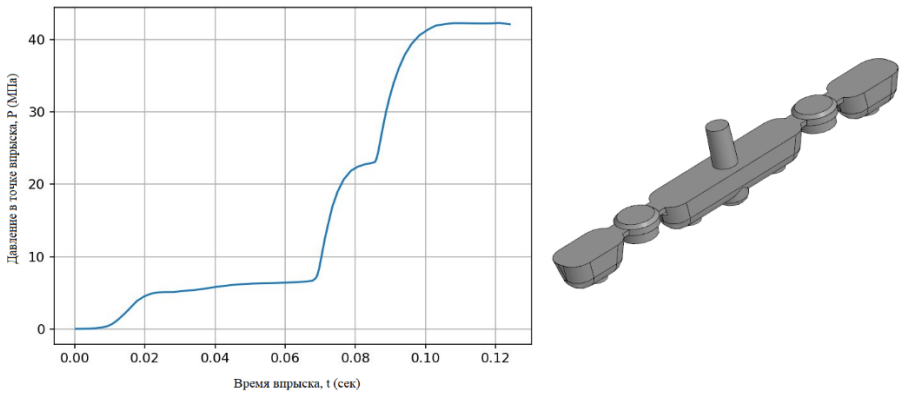


Рис.2. График функции давления в точке впрыска для детали "Стекло"

Очевидно, что даже при использовании одного и того же материала и одинаковой скорости впрыска профили давления целевого случая и прецедента могут сильно отличаться из-за разного размера и количества полостей. Полученные графики давления требуют предварительной обработки для расчета сходства. Во-первых, продолжительность функции давления приводится к единому шагу по времени заполнения формы. Во-вторых, необходимо продлить функцию пока графики не примут одинаковую продолжительность, при этом значения давления в точках продления устанавливаются равными 0.

После выполнения предварительной обработки данных выполняется поиск прецедентов и измерение их сходства с использованием метода k-ближайшего соседа. Выявленные значения сортируются и для дальнейшей работы выбираются случаи с коэффициентом схожести выше порогового значения.

1. Адаптацию режимов литья предлагается выполнять по следующему алгоритму:
2. Если (кол-во прецедентов =1) И (коэффициент схожести >0,95): литьевые режимы полностью переходят новому случаю;
3. Если (кол-во прецедентов >1) И (коэффициент схожести >0,95): используется интерполяции параметров;
4. Если подходящих прецедентов с коэффициентом >0,95 не найдено: порог схожести снижается и применяется интерполяция параметров.

Дальнейшая работа будет направлена на оценку точности выявления аналогов и натурные эксперименты с получаемыми режимами литья.

IV. Заключение

В результате работы был разработан метод назначения технологических режимов при изготовлении полимерных изделий методом литья под давлением на основе прецедентного подхода. В докладе будут представлены результаты работы предлагаемого метода.

Литература

[1] *M. Al-wswasi, A. Ivanov, H. Makatsoris*, "A survey on smart automated computer-aided process planning (ACAPP) techniques", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2018, Vol. 97, pp. 809–832.

[2] *H. Gao, Y. Zhang, X. Zhou, D. Li*, “Intelligent methods for the process parameter determination of plastic injection molding”, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, Vol. 13, pp. 85–95.

[3] *M.R. Khosravani, S. Nasiri*, “Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, Vol. 31, pp.847-864.

[4] *А. В. Чукичев, О. С. Тимофеева, Ю. С. Андреев*, "Интеллектуальные подходы к автоматизации технологической подготовки производства полимерных изделий методом литья под давлением", *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2023, Т. 66, № 1, с. 16-24.

Визуальные языки и методы моделирования бизнес-процессов

Г. Н. Калянов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
kalyanov@ipu.ru

***Аннотация**. В работе проведен анализ современного состояния визуальных языков, моделей, методов и технологий моделирования бизнес-процессов, являющихся одним из основных направлений созданной в ИПУ РАН теории бизнес-процессов. Предложена соответствующая классификация языков и технологий моделирования. Выделены наиболее часто используемые нотации и диалекты языков и проведен их сравнительных анализ, рассмотрены основные направления их развития. Рассмотрены базовые типы технологий моделирования, выявлены их достоинства и недостатки.*

I. Введение

Термин *«бизнес-процесс»* (БП) был введен в начале 90-х г.г. прошлого века Майклом Хаммером и получил широкое распространение после публикации монографии [1], посвященной новому подходу к реорганизации БП – реинжинирингу бизнес-процессов. Однако, исследованиями аналогичных объектов, называемых организационными (организационно-управляющими) процессами, деятельностями, работами и т.п., специалисты начали заниматься достаточно давно. В частности, Франк и Лилиан Гилбрет в 1921 году в своем докладе в ASME (American Society of Mechanical Engineers) предложили нотацию карт процессов (flow process chart), которая с небольшими модификациями используется и по сегодняшний день. Знаковым этапом развития языков описания БП являлся период конца 60-х – начала 70-х г.г. прошлого века – именно тогда появились широко используемые в настоящее время визуальные языки моделирования SADT-IDEF0, DFD, CFD, ERD, STD, прообразы классов объектов - кластеры, а имена их авторов (Росс, Йодан, ДеМарко, Гейн, Сарсон, Майер, Варнье, Орр, Джексон, Константайн, Лисков и др.) известны любому специалисту в рассматриваемой области. Однако приоритет безоговорочно принадлежит опубликованному еще до отмены крепостного права в России отечественному изданию [2], в котором описан не только предшественник перечисленных выше языков моделирования, но предусмотрен и ряд конструкций, характерных для современных языков моделирования, таких как BPML, UEML и др.

За прошедшие годы были предложены десятки и сотни языков визуального моделирования, их нотаций и диалектов, исследования в данном направлении являются одними из ключевых в рамках современной теории БП [3].

II. Языки моделирования и модели БП

Соответствующий раздел теории БП посвящен, прежде всего, структурному подходу к моделированию БП. Концептуальная модель визуального структурного языка приведена в [4], она включает четыре базовых компонента – словарь языка, синтаксис языка, комплект абстрактных семантических правил/процедур, аспекты языковой прагматики.

Имеется три вида базовых моделей БП – *функциональная*, описывающая выполняемые процессом функции, *информационная*, демонстрирующая отношения между данными, *поведенческая*, моделирующая поведение процесса (все три могут включать элементы организационно-структурной модели). По типам модели разделяются на статические и динамические, по уровню формализации – на формализованные и формальные. Позиционирование наиболее часто применяемых языков визуального моделирования в соответствии с их видами, типами и уровнями формализации приведено в таблице 1.

Таблица 1.

нотация языка	функции	данные	поведение	оргструктура	тип	формализация
DFD	+	-:+	-	-:+	стат	формализ.
CFD	+	-:+	+	-:+	стат	формализ.
SADT/IDEF0	+	-	-	-:+	стат	формализ.
ERD, IDEF1X	-	+	-	-	стат	формальная
структурограммы	-	+	-	-	стат	формализ.
STD	-	-	+	-	дин	формальная
BPMN	-:+	-	+	+	дин	формализ.
ePC, IDEF3	+	-	-	-:+	стат	формализ.
сети Петри, IDEF2	-	-	+	-	дин	формальная
смешанные графы	+	+	+	+	стат	формальная

III. Методы и технологии моделирования

Современные технологии моделирования БП разбиваются на два класса – интеграционные и трансляционные. Первые регламентируют объединение моделей различных видов в комплексную модель, позволяющую исследовать объект как единое целое с различных позиций, например, его функциональные, информационные и поведенческие аспекты одновременно. Вторые обеспечивают переход от моделей одного вида к моделям другого вида, более точно и адекватно отражающим целевой процесс.

Примерами интеграционных технологий являются:

1) *DFD/CFD-технология* [5], интегрирующая диаграммы потоков данных/управления DFD/CFD, дополненные словарями данных и спецификациями процессов нижнего уровня (для моделирования функций и функциональных связей процесса); диаграммы «сущность-связь» ERD (для моделирования данных и их взаимосвязей); диаграммы переходов состояний STD (для моделирования поведения процесса).

2) *Семейство стандартов IDEF*, включающее 14 стандартов, из которых для целей моделирования БП использованы следующие: IDEF0 - стандарт функционального моделирования, созданный на основе SADT и являющийся подмножеством названной нотации; IDEF1 - стандарт моделирования информационных потоков, основанный на диаграммах «сущность-связь» в нотации Чена, и IDEF1X - стандарт построения реляционных структур данных; IDEF2 - стандарт динамического моделирования, базирующийся на нотации цветных сетей Петри; IDEF3 - язык описания процессов, определяющий последовательность выполнения действий и взаимозависимости между ними.

3) *Схема Захмана* [6] (модель предприятия) и развивающая ее модель «3D-предприятие», демонстрирующие различные уровни представления архитектуры предприятия (люди - заказчики, пользователи, аналитики, конструкторы и др., организационные структуры, графики работы предприятия, цели и стимулы предприятия и отдельных людей), различные виды его обеспечения, а также их основные взаимосвязи.

Примерами трансляционных технологий являются:

1) *Технология перехода от статических моделей в динамические* (прежде всего, в сети Петри), теоретические основы такого подхода приведены в [7].

2) *Технология перехода от формализованных моделей в формальные*, в частности, переход от IDEF0 или DFD к смешанному графу (алгоритмы такого перехода приведены в [3].

3) *Технология перехода от функциональных моделей в информационные*, в частности, в [3] предлагается следующая схема такого перехода - «функциональная модель в нотации DFD – предварительная информационная схема – концептуальная информационная схема – ER-модель». При этом осуществляется формализованное построение «правильной» модели за счет нормализации

ERD с использованием нормальных форм Кодда, заключающейся в преобразовании схемы к наиболее простой Третьей нормальной форме.

4) *Технология перехода от моделей бизнес-процессов к требованиям по их автоматизации*, задаваемых структурными картами и схемами [3].

Литература

[1] *Hammer M., Champy J.* Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution. N.Y.: Harper-Collins, 1993, 288p.

[2] *Добролюбов Н. А.* Руководство к наглядному изучению административного порядка течения бумаг в России. М., 1858, 20с.

[3] *Калянов Г.Н.* Теория бизнес-процессов. М.: Горячая линия-Телеком, 2023, 296с.

[4] *Калянов Г.Н.* Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов. М.: Финансы и статистика, 2006, 240с.

[5] *Калашян А.Н., Калянов Г.Н.* Структурные модели бизнеса: DFD-технологии. М.: Финансы и статистика, 2003, 256с.

[6] *Zachman J. A.* A Framework for Information Systems Architecture . IBM Syst. J., 1987, vol. 26, №3, pp. 276-292.

[7] *Юдицкий С.А.* Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. М.: СИНТЕГ, 2001, 112с.

Оценка индивидуальных психологических характеристик сотрудника при формировании групп для выполнения сложных и ответственных задач в экстремальных условиях

Е. Б. Новикова, М. П. Фархадов, В. В. Скопин
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
e.novikova@ipu.ru, mais@ipu.ru, svci@mail.ru

***Аннотация**. В работе рассматриваются вопросы применения метода видео-компьютерной психодиагностики для оценки индивидуальных психологических характеристик сотрудника при формировании групп для выполнения сложных и ответственных задач в экстремальных условиях. Применение видеокомпьютерной диагностики для формирования групп в экстремальных ситуациях — это перспективное направление, сочетающее компьютерное зрение, искусственный интеллект и анализ данных для оптимизации действий в условиях чрезвычайных оперативных случаях. Также анализируется актуальная проблема повышения эффективности и безопасности деятельности профессиональных групп, выполняющих сложные и ответственные задачи в экстремальных условиях (чрезвычайные ситуации, военные операции, космические исследования, работы на опасных производствах и др.). Обосновывается критическая важность учета индивидуальных психологических характеристик сотрудников при формировании таких групп. Представлен инновационный подход к оценке индивидуальных психологических характеристик с использованием методов видеокомпьютерной психодиагностики. Подчеркивается необходимость решения этических вопросов и обеспечения надежности алгоритмов. Делается вывод о значительном потенциале видеокомпьютерной психодиагностики для оптимизации кадрового отбора и формирования команд в экстремальных видах деятельности.*

I. Введение

Видеокомпьютерную диагностику возможно применять для оперативной проверки психологического состояния людей экстремальных профессий с целью повышения надежности выполнения ими своих профессиональных обязанностей и предотвращения техногенных катастроф, вызванных человеческим фактором. Также возможно определение психотипа сотрудника при формировании групп для выполнения ответственных задач.

Деятельность в экстремальных условиях (ЭУ) предъявляет исключительные требования к человеческому фактору. Сложность, ответственность, высокие риски, дефицит времени, информационная неопределенность и физиологический стресс создают среду, где успех или неудача критически зависят от психологической готовности и совместимости членов группы [1, 2].

Возникает потребность в объективных, надежных и технологичных инструментах оценки. Видеокомпьютерная психодиагностика (ВКПД) представляет собой перспективное направление, основанное на автоматизированном анализе видеоизображения лица человека для выявления психофизиологических состояний и устойчивых характеристик [3, 4].

II. Цель исследования

Обосновать методологию и практическую значимость применения видеокомпьютерной психодиагностики и психокоррекции для оценки ключевых индивидуальных психологических характеристик сотрудников с целью оптимизации процесса формирования групп для работы в экстремальных условиях.

Видеокомпьютерная психодиагностика: методология и оцениваемые параметры

Психологическое состояние людей экстремальных профессий может меняться в зависимости от ситуации. Поэтому требуется проверка их психологического состояния не только при приеме на работу или профилактическом осмотре, но и в процессе работы оперативно с помощью объективных

средств. В данной статье производится описание профессиональных характеристик, получаемых в результате видео компьютерной психодиагностики, прогноз поведения в экстремальной ситуации, проявления свойства лживости и социально-неодобряемых свойств. Компьютер делит людей на 63 психологических типа. Приводится характеристика, выдаваемая компьютером в результате оперативного анализа изображения лица наблюдаемого человека на примере одного из 63-х психологических типов [5, 6].

Для успешного функционирования в ЭУ сотрудник и группа в целом должны обладать комплексом устойчивых и ситуативных характеристик. Видеокомпьютерная психодиагностика позволяет определить и оценить наиболее значимые из них:

1. Анализ личностных качеств

Изучение темперамента, стиля мышления, стрессоустойчивости и коммуникативных навыков, способность сохранять работоспособность и адекватность поведения под воздействием интенсивных и пролонгированных стрессоров.

2. Выявление сильных и слабых сторон

Определение, какие задачи сотрудник выполняет наиболее эффективно (лидерство, аналитика, креативность и т. д.).

2. Эмоциональная стабильность и саморегуляция

Способность управлять собственными эмоциями (особенно тревогой, страхом, гневом), предотвращать их деструктивное влияние на поведение и взаимодействие, отсутствие склонности к импульсивным или паническим реакциям.

3. Совместимость с другими членами команды

Оценка того, как человек взаимодействует в группе (конфликтность, кооперативность, роль в коллективе).

4. Прогнозирование эффективности

Предсказание, насколько успешно сотрудник справится с ответственными задачами в конкретном составе команды.

Прогноз поведения в экстремальной ситуации

Профессиональная надежность проявляется наиболее наглядно в экстремальной ситуации, когда требуется спасение в широком смысле этого слова-спасение человека, людей, дела, материальных и духовных ценностей. В экстремальной ситуации проявляется сущность человека, т.к. он действует на основе внутренней мотивации и психологической установки- неосознанной готовности к определенным действиям. Чаще всего в экстремальной ситуации человек действует (или бездействует) инстинктивно вследствие преимущественного проявления одного из двух основных человеческих инстинктов: инстинкта сохранения рода и инстинкта эгоцентризма. Инстинкт сохранения рода толкает человека на спасение будущей жизни, а инстинкт эгоцентризма – на доказательство собственной значимости в попытке компенсировать неосознанное чувство собственной неполноценности.

С целью пояснения надежности человека в экстремальной ситуации ниже в Таблице 1 приводится мотивация поведения для 4-х основных психологических состояний в зависимости от доминирования полушария и когерентности между полушариями [6]. Эти два параметра определяются компьютером через оценки фазового портрета лица. В каждой ячейке таблицы перечислены неосознанные мотивации, которые преследует данный психологический тип, действуя инстинктивно в экстремальной ситуации (когда требуется спасение).

Обозначения L-логический, значение отклонения в сторону логики в процентах; I-интуиция, значение отклонения в сторону интуиции в процентах; S- устойчивый, значение устойчивости психических процессов в процентах; D-импульсивный, значение импульсивности психических процессов в процентах. Ниже в Таблице 1 приводятся в процентах вероятности проявления психологического типа «интуитивный импульсивный I80D70» в экстремальной ситуации.

Таблица 1. Вероятность проявления психологического типа
«интуитивный импульсивный I80D70» в экстремальной ситуации

Логический устойчивый LS	Интуитивный устойчивый IS	Логический импульсивный LD	Интуитивный импульсивный ID
Принести пользу социуму	Проявить жалость к беспомощным	Доказать свою значимость, пожертвовав другими	Доказать свою значимость, пожертвовав собой
Спасти себя, чтобы принести пользу социуму и спасти себя, чтобы дальше стоить	Спасти себя, чтобы дальше творить и спасти других из=за чувства жалости к беспомощным	Спасти себя и пожертвовать другими, чтобы доказать свою ценность или спасти других тоже, чтобы понравиться людям	Пожертвовать собой на основе сверхценной идеи спасения, чтобы красиво уйти из жизни из-за подсознательного чувства вины
(L+S)/2=25%	(I+S)/2=55	(L+D)/2=45%	(I+D)/2=75%

Определение вероятности проявления социально неодобряемых свойств.

Компьютер оценивает вероятность проявления следующих социально неодобряемых свойств: зависть, жадность, месть.

Необходимо отметить, что эти оценки не означают, что человек действует именно так и проявляет эти качества здесь и сейчас. Оценивается всего лишь вероятность проявления указанных свойств в определенных условиях. Проще говоря, если человек окажется в неблагоприятных условиях, то у него преимущественно может проявиться то свойство, вероятность которого выше по отношению к другим свойствам, при этом, выше 50%. Внизу на рис. 1 приводится диаграмма, которая показывает в процентах вероятности проявления указанных свойств для рассматриваемого психологического типа.

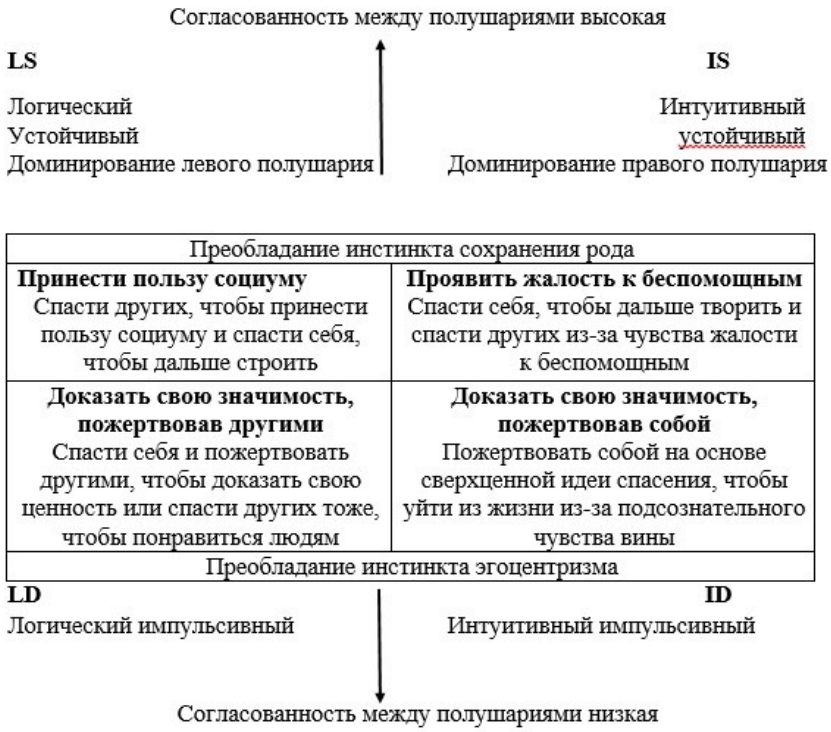


Рис.1. Вероятность проявления социально неодобряемых свойств
в экстремальной ситуации

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование алгоритмов видео-компьютерной психодиагностики, их проверки, подтверждения для конкретных типов экстремальных условий и профессий, разработку этических и правовых рамок использования, а также на интеграцию данных видео-компьютерной психодиагностики с другими источниками информации (биометрические датчики, результаты когнитивного тестирования в стрессе) для построения комплексных предиктивных моделей успешности групповой деятельности в экстремальных условиях.

III. Заключение

Для работы в экстремальных условиях формирование эффективных и надежных групп является сложной многокритериальной задачей, где психологический фактор играет определяющую роль. Видеокомпьютерная психодиагностика предлагает мощный инструментарий для объективной, автоматизированной и высокоинформативной оценки ключевых индивидуальных психологических характеристик сотрудников, критически важных для успеха и безопасности в экстремальных условиях. Возможность интеграции видеокомпьютерной психодиагностики в симуляционные среды (интерактивные VR-тренажеры) позволяет проводить оценку в контексте, максимально приближенном к реальным экстремальным ситуациям.

Применение видеокомпьютерной психодиагностики позволяет перейти от субъективных оценок к данным, основанным на объективных невербальных и физиологических индикаторах, что значительно повышает точность прогноза адаптивного поведения сотрудников под нагрузкой. Это открывает новые возможности с целью оптимизации отбора персонала для работы в экстремальных условиях; формирования сбалансированных и психологически совместимых рабочих групп; разработки персонализированных программ психологической подготовки и тренировок с биологической обратной связью; мониторинга психологического состояния членов группы во время выполнения задач.

Литература

[1] *Леонова А.Б., Кузнецова А.С.*, Психологические технологии управления состоянием человека. М.: Смысл, 2007. 311 с.

[2] *Дикая Л.Г.* Психическая саморегуляция функционального состояния человека (системно-деятельностный подход). М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2003. 318 с.

[3] *Calvo R.A., D'Mello S.*, Affect Detection: An Interdisciplinary Review of Models, Methods, and Their Applications. IEEE Transactions on Affective Computing ,2010, 1(1), pp. 18–37.

[4] *Zeng Z., Pantic M., Roisman G.I., Huang T.S.*, A Survey of Affect Recognition Methods: Audio, Visual, and Spontaneous Expressions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(1), pp. 39–58.

[5] *Новикова Е.Б.*, Диагностика потенциальных клиентов банка на основе метода видео-компьютерной психодиагностики и психокоррекции // *Экономика и предпринимательство*. 2025. № 3 (176) . С. 1227-1234.

[6] *Ануашвили А.Н.* Объективная психология на основе волновой модели мозга. – М.: Экон-Информ, 2008. – 292 с.

Опережающая стандартизация в цифровых системах автоматизации технологических процессов

Е. В. Юркевич, Л. Н. Крюкова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
79163188677@yandex.ru, Lidkryukova@yandex.ru

Аннотация. *С целью разработки методологии поиска эффективных решений в управлении построением цифрового производства предложен подход к формированию многоаспектной парадигмы, определяющей тренд интенсификации выпуска продукции при индивидуальных требованиях заказчика. Показано, что для формирования машиночитаемых нормативных документов рационально введение в SMART-стандарт идентификаторов типов сущностей: «абзац», «графический объект» и «ячейка таблицы». Механизм установки норм с помощью SMART-документа позволяет собирать требования к разнородным технологическим процессам в единую логическую сущность. В применении к цифровому производству рассмотрены технологические активы как элементы социо-киберфизических систем, сочетающих характеристики технологий принятия экспертных решений и параметры производства, которые обрабатываются средствами искусственного интеллекта. В построении механизмов управления систем автоматизации технологических процессов показана рациональность использования в качестве парадигмы норм, установленных согласно технологиям опережающей стандартизации унифицированной архитектуры независимой платформы открытой распределенной системы (OPC UA).*

I. Введение

В настоящее время, среди важнейших трендов роста промышленного потенциала России выделяется интенсификация перехода производственных процессов на технологии 4.0. Спецификой организационных механизмов такого процесса является необходимость одновременного решения практически взаимоисключающих задач: производство средств и систем согласно индивидуальным требованиям каждого заказчика и интенсификация темпов выпуска продукции при ограниченных ресурсах.

Обсуждаемые в литературе методы решения названных задач в основном ориентированы на обеспечение оперативности управления технологическими системами [1]. Однако в ряде ситуаций построение технологических моделей связано с недостаточной адекватностью базы знаний, обобщающей опыт специалистов в конкретной предметной области. Другой подход строится на воздействиях, обеспечивающих эффективность технологического процесса с помощью модели ситуационного управления. В этом случае выбор решения производится согласно нечетким данным характеристик производственных факторов, классифицируемым в пространстве технологических признаков [2].

В данной работе, на примере автоматизированных систем управления технологическими процессами, предлагается подход, определяемый формированием многоаспектной парадигмы, определяющей векторы поиска решения названных задач. В качестве такой парадигмы предлагается рассматривать нормы на функциональные модули организации цифровых производств, заложенные в документах, сформированных согласно технологиям опережающей стандартизации [3].

Интенсификацию цифровых производственных процессов предлагается рассматривать как базовую проблему унификации средств взаимодействия функциональных модулей, обеспечивающей их совместимость.

Ставится задача: на производственной площади, при ограниченных ресурсах, сформировать цифровые линии, с технологическими возможностями, соответствующими нормам, определенным в стандартах на функциональные характеристики унифицированных средств и систем автоматизации.

Особенностью решения такой задачи является рекомендация обеспечения импортонезависимости оснащения данного производства.

II. Основная часть

В принятых положениях стандартизации важным ограничением является то, что минимальной единицей информации, к которой применяются какие-либо действия, является целый документ. При этом пользователи руководствуются только отдельными требованиями, «привязывая» используемые данные не к документу, а к его отдельным нормам в конкретном месте документа. Такая практика определила технологии построения SMART-стандартов. В применении к цифровому производству фиксированные нормы рассматриваются как характеристики технологических активов социо-киберфизических систем. В результате, в нормативных документах предлагается регламентация сочетания характеристик экспертных решений и параметры производства, которые обрабатываются средствами искусственного интеллекта [4].

Формирование цифровых производств предполагает введение возможностей перехода от машиночитаемых документов к их машинопонимаемому контенту. Для этого представляется рациональным размечать его полнотекстовый формат идентификаторами абзаца (PID), учитывающими один из типов сущностей: «абзац», «графический объект» и «ячейка таблицы». В этом случае минимальный объем требования составит 1 абзац, 1 рисунок или 1 ячейка таблицы. Важно то, что текст требований может быть расположен в основной части документа, а данные и иллюстрации, относящиеся к нему – в приложениях. Введение норм установки PID позволит с помощью SMART–документа собирать требования к разнородным средствам реализации технологических процессов в единую логическую сущность.

В общем виде цифровые производства рационально строить с использованием мультисервисных сетей. В настоящее время для построения в системах автоматизации технологических процессов широкое распространение получила модель OSI, определенная в серии стандартов ISO/IEC 7498. Нормой применения данной модели являются межсетевые функции, поскольку доступность коммуникационных услуг определяется взаимодействием между протоколами проектирования сети и управления сетью. Модель OSI построена на протоколах семи уровней [5], при этом можно полагать, что сервисы, определенные ее стандартом для конкретного уровня, могут совмещать решение задач для нескольких уровней.

Необходимость расширения требований к функциональным возможностям систем автоматизации при формировании цифровых производств показало, рациональность использования технологии применения открытой распределенной системы (OPC)[6]. Реализация этого предложения в качестве одного из эффективных решений в управлении цифровой трансформацией технологий в ключевых отраслях отечественной промышленности может явиться действенным фактором обеспечения технологического суверенитета, качества и конкурентоспособности создаваемых цифровых производств и выпускаемой продукции.

Набор протоколов верхних уровней, разработанный в рамках проекта OSI теперь предлагается дополнять введением новых алгоритмов [7]. Так, согласно предлагаемому подходу к построению цифровых производств для поддержания работы автоматизированной сстемы в реальном масштабе времени в качестве перспективной независимой платформы предлагается рассматривать унифицированную архитектуру (OPC UA), которая обеспечивает безопасный и надежный обмен информацией [8]. Ее существенным достоинством является возможность выявления организационных факторов, определяющих согласование требований к технологическим линиям и их программному обеспечению.

С переходом на технологии 4.0 задача интенсификации переоснащения производственных процессов определила направление в создании системы нормативов, регламентирующих алгоритмы учета индивидуальных требований заказчика, а также введение в сеть свойства адаптивности, характеризующую ее интеллектуальность. Теперь каждое устройство или служба должны получать возможность автономно инициировать связь с другими службами.

Унификация алгоритмов, построенных на стандартах OPC UA, дает возможность вместо модели «клиент/сервер» использовать модель «издатель/подписчик» совместно с технологией, определенной стандартом передачи данных в реальном масштабе времени в детерминированных сетях Ethernet. Модель «клиент/сервер» хорошо работает в случае подключения «точка-точка», но если устройств становится много, то появляются задержки в обновлении данных. Реализация на стандартах OPC UA модели «издатель/подписчик», обеспечивает связь «от одного ко многим» и «от многих ко многим». В этом случае сервер отправляет свои данные в сеть, и их может получать каждый клиент.

В целом, эффективность использования предлагаемого принципа управления на основе формирования многоаспектной парадигмы подтверждается опытом введения в план национальной стандартизации и построения системы стандартов OPC UA. Импортонезавимсимость отечественных средств автоматизации технологических процессов подтверждается применением национальных стандартов, не идентичных стандартам МЭК и ИСО. Согласно мнению профильных технических комитетов по стандартизации разработанные нормы, регламентирующие концепцию стандартизации унифицированной архитектуры OPC [9], модели ее безопасности [10] и адресного пространства [11], могут рассматриваться как характеристики трендов развития цифрового производства.

Решение методологических задач опережающей стандартизации программных интерфейсов, предполагающее необходимость учитывать их зависимость от применяемых средств автоматизации, определяет нормативные условия рационального взаимодействия между функциональными блоками. Влияние данного фактора предлагается регламентировать на основании норм, согласно разработанным стандартам OPC UA на информационную модель [11] и сервисы [12]. Для выявления особенностей технологии OPC UA разработан комплекс нормативов возможностей модификации семиуровневой модели протокола, определенной в стандарте ISO 7498, [13].

III. Заключение

Применение разрабатываемого подхода позволит формировать механизм функционально-структурного поиска эффективных решений в условиях многоаспектности характеристик объекта управления. Для цифрового производства, применительно к различным отраслям хозяйственного комплекса страны, использование принципа формирования многоаспектной парадигмы является одним из решений в создании рациональных механизмов управления технологическим развитием на предприятии.

Литература

[1] *Трахтенгерц Э.А., Иванилов Е.Л., Юркевич Е.В.* Современные компьютерные технологии управления информационно-аналитической деятельностью // М: СИНТЕГ, 2007. – 372 с.

[2] *Головин С.А., Лоцманов А.Н., Позднеев Б.М.* Стратегия информационного обеспечения эффективного вхождения промышленности России в современные условия // Стандарты и качество № 7 (997), 2020 г. С. 68-73. [3] *Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н.* Проблемы нормативного обеспечения функциональной надежности цифрового производства // Надежность. 2024. №3. С. 52-60. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-52-60

[4] Рассел С., Норвинг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2015. – 1408 с.

[5] *Филимонов А. Ю.* Построение мультисервисных сетей Ethernet. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007, – 592 с.

[6] *Бабенко Е.В., Позднеев Б.М.* Разработка и применение новой системы национальных стандартов для цифрового развития промышленности // Инновации в менеджменте. – 2024. – № 1(39). – С. 72-79

[7] *Белобрагин, В.Я*. Техническое регулирование на рубеже индустрии 4.0. Монография / В.Я. Белобрагин, А.В. Зажигалкин, Т.И. Зворыкина — М.: Научный консультант, 2019. – 95с.; ISBN 978-5-907084-65-0.

[8] *Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M*. OPC Unified Architecture. Berlin: Springer, 2009. – 351 с.

[9] ГОСТ Р 71806-2024 Цифровая промышленность. Унифицированная архитектура OPC. Часть 1. Обзор и концепции.

[10] ГОСТ Р 71808-2024 Цифровая промышленность. Унифицированная архитектура OPC. Часть 3. Модель адресного пространства.

[11] ГОСТ Р 71809-2024 Цифровая промышленность. Унифицированная архитектура OPC. Часть 4. Сервисы.

[12] ГОСТ Р 71810-2024 Цифровая промышленность. Унифицированная архитектура OPC. Часть 5. Информационная модель.
[13] ГОСТ Р 71811-2024 Цифровая промышленность. Унифицированная архитектура OPC. Часть 6. Сопоставления.

Методы анализа фрагментов научных публикаций, плохо поддающихся распознаванию: таблицы, графики, изображения

Е. Ю. Давыдов[1], С. А. Мальгина[1], М. П. Фархадов[2], О. В. Блинова[2]

[1]Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия,

[2]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
eyudavydov@vniief.ru, SAMalgina@vniief.ru,
mais.farhadov@gmail.com, blinova_olga_v@mail.ru

Аннотация. *Мы работаем с автоматизированными методами анализа научно-технической документации, в том числе семантического. Смысловой анализ результатов работы ученого с помощью систем искусственного интеллекта – это сложная задача, которая дополнительно усложняется потерей части информации при извлечении текста из публикации или другого документа. Большинство систем распознавания текста и поиска по тексту никак не обрабатывают изображения, графики, формулы. Таблицы частично обрабатываются, но могут терять большую часть смысла из-за разрушения структур данных. В статье рассматриваются методы, которые могут полностью или частично предотвратить потерю данных в существующих и в будущих публикациях. В связи с стремительным развитием систем ИИ и делегированием многих задач по обработке текстов программным системам авторам научных работ стоит задуматься о читаемости статей не для человека, а для машинной обработки.*

I. Введение

Обработка текстовых документов с помощью больших языковых моделей обладает очень широкими возможностями, уже сейчас показывает прекрасные результаты и, очевидно, будет активно развиваться и дальше [1]. Научная документация обладает рядом особенностей, отличающих ее от произвольного документа [2]. Одна из таких особенностей, хоть и не исключительная, это активное использование формул, таблиц, графиков и изображений для демонстрации результатов. Именно в этих объектах могут быть ключевые результаты или основной результат работы. Но, к сожалению, при автоматизированной обработке текста часто такие объекты не смогут быть обработаны. По ним не будет работать текстовый поиск, эти результаты не будут отражены в аннотациях и сводных документах, если интеллектуальные системы ориентированы на обработку текстовых данных. Они могут теряться при переводе текста в другие форматы. Таким образом может быть потеряна критически важная информация.

II. Методы обработки и анализа

Есть несколько различных подходов к решению указанной проблемы. Первый и самый простой – это сохранение структуры документа при применении автоматизированной обработки для того, чтобы эти данные не были потеряны и их мог бы обработать человек-оператор. Выделение таких объектов, определение их типа, обозначение их расположения в документе и отображение их там, где их приводил автор документа. Эта задача решаема современными методами и средствами, главное не забыть, что эти фрагменты несут существенный смысл и необходимы специальные инструменты для их сохранения. Главные недостаток – никакие последующие обработки не смогут оценить важность фрагмента и сохранить его смысл.

Второй подход – улучшение и разработка средств автоматизированного распознавания и описания того, что приведено на объекте. Некоторые интеллектуальные системы уже справляются с такими задачами на достаточно хорошем уровне. Были проведены эксперименты на способность открытых LLM распознать и описать то, что написано формулой и представлено в виде изображения этой формулы [3]. При использовании известной формулы полученное качество ответов было

достаточно высоким, несмотря на неполные данные на изображении. Но, вероятно, при использовании новых уникальных результатов качество ответов может быть значительно ниже. Текстовое описание формулы или изображения может помочь оценить его и сохранить смысл. Основные проблемы заключаются в сложности качественного распознавания (иногда и специалисту бывает сложно правильно интерпретировать результат или осмыслить формулу), проверке достоверности и качества полученного описания.

Третий подход – разработка интерактивных средств для создания НТД с учетом последующей обработки системами ИИ [4]. Для этого может быть использован богатый опыт создания web-ресурсов. Сам автор будет составлять дублирующие формулу или изображение текстовые описания, составлять справочники определений и обозначений, которые будут интегрированы с текстом в виде интерактивного справочника, обозначать области на графиках в виде отдельных объектов с свойствами и описанием. Возможно, при составлении он же будет пользоваться интеллектуальным помощником. В таком случае качество обработки и анализа документа будет выше, количество ошибок и неточностей сократится, потери информации тоже уменьшатся. Именно этот подход представляется наиболее перспективным. Но он требует разработки интерактивных интеллектуальных систем, обучению пользователей применению подобных систем, выработки соглашений про используемые форматы, большой работы по переводу архивов НТД в интерактивные форматы.

III. Заключение

Обработка НТД требует особого внимания и отдельных подходов в связи с уникальностью и ценностью содержащейся в них информации, использованием большого количествами специальных терминов и обозначений, частично формализованному формату данных и разнообразию форм их представления. Важно не допускать искажения смысла или потерю имеющих ключевое значение данных в связи с некачественной программной обработкой НТД. Необходимо разрабатывать методы и технологии действительно глубокого анализа смыслового содержания документа, в т.ч. не допуская потерю смысла приведенных формул, графиков, изображений, таблиц. Нужно стремиться к представлению НТД в виде интерактивного документа, снабженного описаниями, справочниками, подсказками, современными средствами представления данных.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах.

Литература

[1] *А. Д. Агафьина, А. А. Никитин* “Об автоматическом распознавании печатного текста” //*International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. №. 9. С. 48-61.

[2] *М. П. Фархадов, О.В. Блинова, Е.В. Панкратова “*Обзор научных информационных систем” *// I международная научная конференция «Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации».* Ташкент, 2023. С.874-884.

[3] *А. Ф. Колесникова, А. С. Анафиев* “Программная реализация системы для голосового ввода математических формул” //*Математика, информатика, компьютерные науки, моделирование, образование.* 2017. С. 144-149.

[4] *А. Д. Полянин, И. К. Шингарева “*Индекс подобия математических и других научных публикаций с уравнениями и формулами и проблема идентификации самоплагиата” //*Математическое моделирование и численные методы.* 2021. №. 2 (30). С. 96-116.

Подготовка IT-специалистов к разработке AI-решений для цифровых экосистем производства и логистики

Е. Ю. Суворова, Д. А. Капустин, Р. Н. Сентяй
Луганский государственный педагогический университет, г. Луганск, Россия,
suvorova.itstep@ya.ru

Аннотация. *Проводится комплексное исследование проблем подготовки будущих IT-специалистов к разработке и внедрению решений на основе искусственного интеллекта (AI) в контексте цифровой трансформации российских промышленных предприятий. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием технологий Industry 4.0 и острым дефицитом квалифицированных кадров, способных эффективно внедрять AI-решения в производственные процессы. Особое внимание уделяется анализу разрыва между требованиями цифровых экосистем и содержанием существующих образовательных программ в российских вузах. Методология включает анализ международного опыта, российских профессиональных стандартов и практик ведущих промышленных компаний. Результаты исследования выявили ключевые недостатки современной системы подготовки: отсутствие практико-ориентированных модулей, дефицит преподавателей с промышленным опытом, несоответствие компетенций выпускников реальным производственным задачам. На основе проведенного анализа авторами предложена модель модернизации IT-образования с учетом потребностей цифровых экосистем производства и логистики.*

I. Введение

Современный этап технологического развития, называемый Четвертой промышленной революцией (Industry 4.0), сопровождается глубокой цифровизацией всех сфер экономики и социальной жизни. Этот переходный период предъявляет принципиально новые требования к профессиональной подготовке будущих IT-специалистов. Как отмечают эксперты международной консалтинговой группы McKinsey & Company, глобальный дефицит квалифицированных кадров для реализации AI-проектов в промышленности достигает критических масштабов [1]. В условиях развития российской экономики данная проблема усугубляется, поскольку на нее накладываются внешние факторы, такие как санкционное давление и необходимость ускоренного импортозамещения в ключевых секторах высокотехнологичной инфраструктуры.

Актуальность исследования обусловлена рядом объективных причин, связанных с глубокими структурными изменениями в экономике и промышленности. В условиях ускоренной цифровой трансформации российских промышленных предприятий, которая затрагивает все этапы производственного цикла – от проектирования до логистики и сервисного обслуживания – возникает необходимость модернизации кадрового потенциала [2]. Остро ощущается нехватка специалистов, обладающих не только высокой квалификацией в области IT, но и глубоким пониманием специфики производственных процессов, что особенно важно для эффективной интеграции цифровых решений в традиционные отрасли. Дополнительным фактором, усиливающим проблему, является отставание системы профессионального образования от быстро меняющихся требований цифровых экосистем, что делает актуальным пересмотр подходов к подготовке кадров, а также формирование новых образовательных программ, ориентированных на междисциплинарное знание и практико-ориентированное обучение.

II. Методология исследования

Исследование базируется на комплексном анализе данных из нескольких источников. Во-первых, были изучены отраслевые отчеты McKinsey [1] и исследования НИУ ВШЭ [3], позволившие выявить ключевые тренды цифровой трансформации. Во-вторых, проведен анализ

профессиональных стандартов УГ 06 [5], определяющих требования к IT-специалистам в промышленности.

Особое внимание уделено практическому опыту ведущих компаний («Росатом» [6], X5 Group [7]) в подготовке кадров для цифровой экономики. Дополнительно рассмотрены подходы образовательных центров (Сколтех [8], ИТМО [9]) к адаптации учебных программ под современные требования.

III. Основные результаты исследования

Анализ данных от НИУ ВШЭ выявил существенный дисбаланс между запросами промышленных предприятий на специалистов в области AI и возможностями существующей системы подготовки кадров. Ключевые проблемы заключаются в отрыве образовательных программ от практики (78% не включают работу с реальными промышленными данными) и дефиците преподавателей с практическим опытом внедрения AI (всего 12%). В условиях стремительного развития Industry 4.0 эти недостатки требуют срочного устранения и оперативного реагирования со стороны образовательных учреждений.

При этом профессиональный стандарт укрупненной группы 06 недостаточно учитывает современные требования к подготовке IT-специалистов для промышленных AI-решений. В частности, он не охватывает работу с промышленными данными (SCADA, MES-системы), интеграцию AI-решений с киберфизическими системами и специфику разработки производственных моделей. Также он не отражает необходимость глубокого понимания технологических процессов и управления жизненным циклом промышленных AI-систем.

В ответ на эти вызовы Минтруд России совместно с Национальным агентством развития квалификаций инициировали разработку специализированного профессионального стандарта для работы с искусственным интеллектом [10]. Ожидается, что документ закрепит требования к работе с промышленными данными, интеграции AI-решений в производственные процессы и пониманию технологических циклов. Данная инициатива создаст нормативную базу для модернизации IT-образования в условиях цифровизации промышленности. В качестве переходного решения мы предлагаем поэтапную адаптацию образовательных программ с учетом формирующихся требований Industry 4.0.

IV. Обсуждение

Проведенный анализ выявил необходимость разработки гибкой адаптационной модели подготовки IT-специалистов, которая могла бы эффективно функционировать в переходный период до введения специализированного ПС для работы с ИИ. Концептуально эта модель должна стать связующим звеном между существующей системой профессиональных стандартов и перспективными требованиями цифровых производственных экосистем.

Основу предлагаемой модели составляет принцип динамического соответствия, предполагающий постоянную корректировку образовательных программ подготовки IT-специалистов по мере развития технологий и изменения нормативной базы. Такой подход особенно актуален в условиях, когда технологические изменения опережают процессы стандартизации профессиональной деятельности. Модель строится на механизмах обратной связи с промышленными предприятиями, что позволяет оперативно выявлять новые компетенции, востребованные на производстве.

Важнейшим элементом модели становится создание гибридных образовательных форматов, сочетающих фундаментальную IT-подготовку с углубленным изучением производственных процессов. Это достигается через разработку междисциплинарных курсов, объединяющих компьютерные науки с технологиями конкретных отраслей промышленности. Особое внимание следует уделить формированию у студентов системного мышления, необходимого для понимания взаимосвязей между AI-решениями и производственными циклами.

Структурно модель предполагает поэтапное наращивание специализации: от базовых IT-компетенций через отраслевые модули к решению комплексных производственных задач. Такой подход позволяет сохранить фундаментальность образования, одновременно обеспечивая его практическую ориентированность. Ключевым элементом должны стать цифровые платформы, объединяющие образовательные организации и промышленные предприятия для совместной работы над реальными задачами.

Реализация модели потребует создания новых организационных механизмов, в частности, сети отраслевых центров компетенций, которые будут аккумулировать передовой опыт и разрабатывать методическое обеспечение. Эти центры призваны стать связующим звеном между системой образования и производством, обеспечивая трансфер технологий и знаний в обоих направлениях.

V. Заключение

Исследование подтвердило необходимость пересмотра подходов к подготовке IT-специалистов в условиях цифровизации промышленных экосистем. Анализ показал существенный разрыв между возможностями системы образования и требованиями предприятий, внедряющих AI-технологии.

Основной вывод работы – необходимость создания адаптивной модели подготовки, сочетающей фундаментальные IT-знания с практическим освоением промышленной специфики. Особое значение приобретают практико-ориентированные форматы обучения на реальных производственных задачах.

Ключевым условием эффективности предлагаемой модели становится тесная интеграция образования и производства. Такой подход позволит готовить специалистов, способных не только разрабатывать, но и успешно внедрять AI-решения для цифровых экосистем производства и логистики.

Литература

[1] McKinsey Technology Trends Outlook 2024. URL: *https://www.mckinsey.com/capabilities/ mckinsey-digital/our-insights/the-top-trends-in-tech* (дата обращения 10.06.2025).

[2] Формирование цифровой экономики и развитие сквозных цифровых технологий в России как императив новой парадигмы экономического роста / *Алексеева Ю.Б., Бабина Е.Н., Бабина Н.В. и др.; под ред. Шихалиевой Д.С., Подкопаева О.А.* Самара: ООО НИЦ «ПНК», 2023. 300 с.

[3] Цифровая экономика 2023: краткий статистический сборник / *Г. И. Абдрахманова, С.А. Васильковский, К.О. Вишневский и др.*; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2023. 120 с.

[4] Индекс готовности приоритетных отраслей экономики Российской Федерации к внедрению искусственного интеллекта. Аналитический доклад. М.: Национальный центр развития искусственного интеллекта при Правительстве Российской Федерации, 2024. 91 с.

[5] Профессиональный стандарт 06 «Связь, информационные и коммуникационные технологии». URL: *https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157436/f6c140f34ed0fa511e3eff43b455e64041b109fc* (дата обращения 10.06.2025).

[6] Годовой отчет ГК «Росатом». Социальный отчет. Ч. 3, 2023. URL: *https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2023/app/rosatom_2023_3.pdf* (дата обращения 10.06.2025).

[7] Годовой отчет ПАО «Корпоративный центр X5 Retail Group», 2024. URL: *https://www.x5.ru/ru/investors/reports* (дата обращения 10.06.2025).

[8] *Д. Белоусов*. Синхронизация национальных рынков труда и систем образования: как достичь и оценить эффект. *Пленарная дискуссия*, 2024. URL: *https://www.skolkovo.ru/notes/sinhronizaciya-nacionalnyh-rynkov-truda-i-sistem-obrazovaniya-kak-dostich-i-ocenit-effekt/* (дата обращения 10.06.2025).

[9] *К. Ослопова*. Как ИТМО трансформирует учебные программы под запросы рынка // *Коммерсантъ*, 2025. URL: *https://www.kommersant.ru/doc/4671682* (дата обращения 10.06.2025).

[10] Национальное агентство развития квалификаций. Разработка профстандарта для работы с ИИ. URL: *https://nark.ru/news/spk/razrabotan-profstandart-dlya-raboty-s-ii* (дата обращения 10.06.2025).

Специфика расчетов экономической эффективности ограничения когнитивной сложности IDEF0-диаграмм

А. В. Григорьев, В. К. Ремизов
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия,
grigorievalvl@gmail.com, vsevolod.remizov@gmail.com

***Аннотация**. В статье рассматривается проблема когнитивной перегрузки при работе с IDEF0-диаграммами, возникающая вследствие роста их сложности в процессе проектирования. Описан алгоритм работы системы, предназначенной для автоматического ограничения когнитивной сложности путем декомпозиции диаграмм. Предложены формулы для оценки временных затрат и количества ошибок при взаимодействии с диаграммой в зависимости от ее когнитивной сложности. Основное внимание уделено оценке эффективности системы: произведен расчет экономического эффекта от ее применения с учетом таких показателей, как чистая приведенная стоимость (NPV), внутренняя норма доходности (IRR), рентабельность инвестиций (ROI) и срок окупаемости (PBP). Полученные результаты демонстрируют, что использование системы способствует снижению издержек, повышению качества проектных решений и ускорению процессов сопровождения программных продуктов.*

I. Введение

С ростом сложности программных систем увеличивается число блоков и связей в IDEF0-диаграммах, что приводит к когнитивной перегрузке проектировщика, снижает его производительность и ухудшает память [1-2]. Это негативно влияет на точность проектирования и увеличивает затраты на разработку и сопровождение. В этих условиях автоматизация ограничения когнитивной сложности является перспективным направлением. Однако для внедрения такой системы необходимо не только техническое, но и экономическое обоснование ее эффективности. Расчеты, подтверждающие, что снижение когнитивной сложности сокращает как время, так и затраты на исправление ошибок и обучение, позволяют аргументированно обосновать выбор автоматизации. Особенность предлагаемого подхода заключается в сочетании оценки когнитивной сложности с анализом экономических эффектов на основе временных и качественных параметров. Это позволяет оценивать эффективность системы не только с позиции удобства использования, но и с точки зрения экономической обоснованности.

Таким образом, актуальность статьи обусловлена необходимостью количественной оценки результатов автоматизации, направленной на снижение когнитивной сложности IDEF0-диаграмм. Цель статьи – анализ эффективности разработанной системы в практике проектирования IDEF0-диаграмм.

II. Описание системы

Задача ограничения когнитивной сложности IDEF0-диаграмм направлена на снижение когнитивной нагрузки при восприятии модели. Её специфика заключается в необходимости баланса между упрощением структуры и сохранением полноты описания процессов. Предлагаемый в системе подход использует количественную оценку когнитивной сложности на основе весов блоков и связей (1), что позволяет выявлять перегруженные участки диаграммы и перераспределять информацию с помощью декомпозиции, сохраняя все логические связи.

$$S = K_l L + K_b \sum_{j=1}^{B} \left(K_{in} In_j + K_{out} Out_j + K_{mech} Mech_j + K_{cont} Cont_j \right) \quad (1)$$

где K_l, K_b, K_{in}, K_{out}, K_{mech}, K_{cont} – весовые коэффициенты; $\boldsymbol{L}$ – количество связей; $\boldsymbol{B}$ – количество блоков; In_j, Out_j, $Mech_j$, $Cont_j$ – количество входов, выходов, механизмов и управлений $\boldsymbol{j}$-го блока.

Система упрощает исходную диаграмму до заданного пользователем уровня сложности, перенося часть блоков на новую диаграмму. Система также предлагает минимально достижимый уровень сложности [3]. Результатом работы системы являются две диаграммы – упрощенная исходная диаграмма и ее декомпозиция (см. рис. 1).

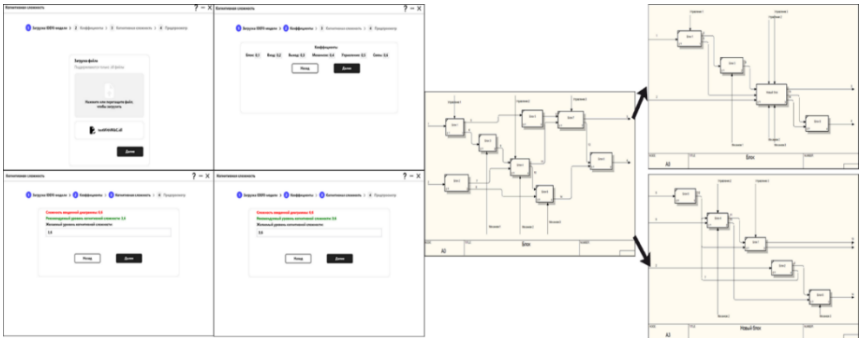


Рис.1. Результаты работы системы [3]

II. Издержки, вызванные высоким уровнем когнитивной сложности IDEF0-диаграмм

К числу основных последствий высокой когнитивной сложности IDEF0-диаграмм относятся:

увеличение времени проектирования, разработки и сопровождения, а также рост количества ошибок вследствие физического и психологического истощения, вызванного излишней когнитивной нагрузкой [4-6];

увеличение затрат на обучение сотрудников, вызванное тем, что сложные диаграммы требуют больше времени для первоначального изучения [7-8];

снижение качества проектных решений из-за затрудненного понимания логики процессов [7, 9].

III. Расчет экономического эффекта

На основе практического применения системы были произведены расчёты временной и качественной эффективности. Время работы с диаграммой рассчитывается по степенной зависимости (2) аналогично подходам, используемым в модели COCOMO [10] для определения трудоемкости системы, что придаёт расчётам методологическую обоснованность. Такой подход оправдан тем, что сложность диаграммы, как и кода, влияет на когнитивную нагрузку и, соответственно, на временные затраты.

$$T = T_{min} + S^k \quad (2)$$

где T_{min} – базовое время (мин.), S – когнитивная сложность, k – коэффициент влияния, определяется эмпирически.

Экономия времени работы с диаграммой и уменьшение количества ошибок рассчитывается по формулам (3) и (4) соответственно.

$$\Delta T = T_{\text{до}} - T_{\text{после}} = S^k_{\text{до}} - S^k_{\text{после}} - T_{min} - S^k_{\text{декомп}} \quad (3)$$

где $T_{до}$ и $\underline{S_{до}}$ / $T_{после}$ и $S_{после}$ – значение времени и сложности до/после упрощения, $S_{декомп}$ – сложность диаграммы-декомпозиции.

$$\Delta E = k_e * \left(S^k_{\text{до}} - S^k_{\text{после}} - S^k_{\text{декомп}}\right)$$

где k_e – коэффициент ошибки.

Таким образом, при снижении сложности диаграммы с 6.6 до 3.6 и ставке 150 руб./ч получены следующие результаты (при 15 мин. на ошибку и 30 мин. на преобразование):

- экономия времени: 20.33 руб.;
- экономия на снижении ошибок: 49.13 руб.;
- автоматизация декомпозиции: 75 руб.;
- общий эффект на 1 диаграмму: 144.46 руб.

IV. Расчет экономической эффективности

Для оценки экономической эффективности системы использовались следующие данные:

- период анализа: 5 лет;
- инвестиции: разработка системы и обучение сотрудников – 200 тыс. руб.;
- текущие затраты: сопровождение и поддержка системы – 20 тыс. руб./год;
- годовая экономия при 1000 диаграммах – 144460 руб./год;
- чистая экономия с учетом затрат – ≈124460 руб./год со 2-го года;
- ставка дисконтирования инновационного проекта – 25%.

В результате проведенных расчетов были получены следующие значения показателей экономической эффективности: *NPV* (r=25%) – 134707.79 руб., *IRR* – ≈55%, *ROI* – ≈211, *PBP* – 1.6 лет.

V. Заключение

Расчеты, основанные на зависимости между когнитивной сложностью, временем и ошибками, позволяют обоснованно выбирать средства автоматизации в проектной деятельности. Анализ показал, что разработанная система не только повышает качество проектирования, но и обеспечивает экономию затрат и рост производительности. Это подтверждает ее актуальность и практическую ценность для организаций, работающих с информационными и техническими системами. Данная система может быть интегрирована в состав автоматизированных средств проектирования и сопровождения.

Литература

[1] *Fox J.R., Park B., Lang A.* When Available Resources Become Negative Resources: The Effects of Cognitive Overload on Memory Sensitivity and Criterion Bias // *Communication Research*. — 2007. — Vol. 34, № 3. — P. 277–296. — DOI: 10.1177/0093650207300429.

[2] *Gonçales, L. J., Farias, K., da Silva, B. C.* Measuring the cognitive load of software developers: An extended Systematic Mapping Study // *Information and Software Technology*. — 2021. — Vol. 136. — 106563. — DOI: 10.1016/j.infsof.2021.106563. — URL: *https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095058492100046X* (дата обращения: 25.05.2025).

[3] *Ремизов, В.К., Григорьев, А.В.* Методы тестирования, оценки и ограничения когнитивной сложности IDEF0-диаграмм. // *Информатика и кибернетика*. – Д.: ДонНТУ, 2024. – №4 (38).

[4] *Поликанова И. С., Сергеев А. В.* Влияние длительной когнитивной нагрузки на параметры ЭЭГ // Национальный психологический журнал. — 2014. — № 1 (13). — С. 86–94. — DOI: 10.11621/npj.2014.0109.

[5] *Rauffet P., Moga S., Kostenko A.* Cognitive control and mental workload in multitasking // arXiv preprint arXiv:2406.06178. — 2024. — URL: *https://arxiv.org/abs/2406.06178* (дата обращения: 15.04.2025).

[6] *Kurian R.M., Thomas S.* Perceived stress and fatigue in software developers: Examining the benefits of gratitude // Personality and Individual Differences. – 2023. – Vol. 201. – Art. 111923. – ISSN 0191-8869. – DOI: 10.1016/j.paid.2022.111923.

[7] *Malinova M., Mendling J.* Cognitive Diagram Understanding and Task Performance in Systems Analysis and Design // MIS Quarterly. – 2021. – Vol. 45, No. 4. – P. 2101–2158. – DOI: 10.25300/MISQ/2021/15262.

[8] *Alhazmi S., Thevathayan C., Hamilton M.* Reducing cognitive load in learning to model UML sequence diagrams // Advances in Information Systems Development / eds. Insfran E. et al. – Cham: Springer, 2022. – (Lecture Notes in Information Systems and Organisation; Vol. 55). – DOI: 10.1007/978-3-030-95354-6_11.

[9] *Yoghourdjian V., Abbad-Andaloussi A., Burattin A., Slaats T., Kindler E., Weber B.* Complexity in declarative process models: Metrics and multi-modal evaluation // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 233. – Article No. 119620. – DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119620.

[10] *Boehm B. W., Abts C., Brown A. W., Chulani S., Clark B., Horowitz E., Madachy R., Reifer D., Steece B.* Software Cost Estimation with COCOMO II. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2000.

Методы анализа эффективности буровых работ и их программные реализации

Н. В. Пальчунов, А. А. Жигар, Г. В Чекан
ООО «Innerica» - резидент ПВТ, г.Минск, Республика Беларусь,
office@innerica.ru

***Аннотация**. В работе рассмотрены современные методы анализа эффективности буровых работ, основанные на детальной обработке данных измерительных станций контроля, непрерывной геолокации объектов бурения и постоянного геологического контроля пластопересечения. Информационные технологии позволяют оперативно (практически в режиме реального времени) принимать аргументированные управленческие решения в процессе строительства буровых скважин. Сервисная организация работ на буровой требует разработки и внедрение качественно новых программных решений, основанных на WEB-платформе и соблюдении международных норм сбора и хранения информации. Рассмотрены базовые программные комплексы, прошедшие успешную апробацию на объектах бурения и не уступающие западным аналогам.*

I. Введение

Строительство буровых скважин представляет собой сложный технологический процесс, сопряженный с рисками различной природы и требующий принятия адекватных управленческих решений. В последние годы появились методы анализа эффективности буровых работ с применением данных различных станций контроля и возможностей информационных технологий, а именно:

- автоматическое распознавание основных технологических операций, позволяющее выделить скрытое непроизводительное время (НПВ);
- мониторинг бурения с оценкой детального механического каротажа (ДМК) с возможностью прогнозировать время отработки долот и оптимизации компоновки низа бурильной колонны (КНБК);
- разработка индивидуальных планов строительства скважин с учетом опыта строительства скважин-соседок;
- возможность контроля и управления строительством нескольких скважин из единого ситуационного центра в реальном времени;
- геонавигация на основе инклинометрических измерений в реальном времени с оперативной оценкой геологической ситуации.

Кроме того, организационной особенностью строительства современных буровых скважин является повсеместное привлечение многочисленных сервисных подрядчиков для выполнения полного комплекса буровых работ. В свою очередь такая модель управления требует внедрение супервайзерской службы и разработки инновационного программного обеспечения (ПО). По оценкам экспертов в настоящее время используется более 85% западного программного обеспечения (ПО), применяемого для бурения скважин. С введением ограничений, санкций и запретов на использование импортного ПО, российские нефтегазовые и нефтесервисные компании активно ищут замену известным мировым производителям: Halliburton\Landmark, Schlumberger, Peloton, ProNova и др.

II. Программный комплекс «Траектория»

Компанией «Innerica» разработана линейка программных продуктов и платформенных решений (далее - специализированных программных комплексов - ПК) «Innerica Цифровое Бурение», которые могут комплектоваться в единую систему класса MES (Manufacturing Execution

System) и масштабироваться как для нефтегазовых, так и нефтесервисных компаний с учетом их потребностей и нацеленностью на повышение эффективности производства буровых работ.

Для проводки траектории ствола по заданному профилю непосредственно для буровых объектов разработан ПК «Траектория». Точность траектории скважины в процессе бурения является ключевым фактором, обеспечивающим *безопасность и надежность* процесса строительства скважины, что увеличивает скорость проходки и оптимизирует длину скважины и, как следствие, положительным образом влияет на *стоимость* буровых работ. На его базе для ПО «Белоруснефть» и для ПАО «Татнефть» было реализовано единое корпоративное решение по оперативному управлению процессом направленного бурения скважины, с возможностью 3D-визуализации инклинометрических объектов, с единой библиотекой расчетных функций и базой данных.

Дистанционный уровень управления траекторией поддерживается соответствующим Web-приложением, которое в круглосуточном режиме обеспечивает инженерно-технологическое и телеметрическое сопровождение траекторий всех активных скважин с контролем сближения с соседками и соблюдения заданного 3D-профиля по данным телеметрии с забоя скважины в реальном времени [1]. Таким образом, достигается контроль из единого центра за работой на буровых объектах с автоматической диагностикой проблемных профилей и оперативной их корректировкой.

Отметим, что одновременное функционирование двух перечисленных траекторных приложений перекрывает базовый функционал ведущих в данной области зарубежных программных продуктов, таких как COMPASS, WELLPLAN.

III. Управление параметрами бурения

Важным исполнительно-техническим компонентом, непосредственно влияющим на точность и безопасность проводки траектории, является компоновка низа бурильной колонны с внутрискважинным оборудованием и инструментами, где ключевая роль отведена породоразрушающему инструменту (долоту). Для информационной поддержки данного процесса разработаны два программных продукта:

- ПК «Innerica КНБК» - для автоматизации процессов технологического учета и мониторинга наработки элементов КНБК в цикле буровых работ по всем целевым скважинам;
- ПК «Парк долот» - для автоматизации процессов сопровождения буровых долот с оперативным отслеживанием их логистики и технологического учета наработки, включая мониторинг критической наработки в целях контроля износа долота и оптимизации скоростей бурения.

Возможность одновременного цифрового контроля за направлением бурения скважины и состоянием бурового инструмента позволяет оперативно управлять режимными параметрами бурения, соблюдение которых осуществляется в ПК «Innerica Мониторинг» на Web-платформе в рамках комплекса геолого-технологических и информационных задач:

- дистанционное подключение к данным телеметрии через программу «Агент» в любой точке мира без установки цифровых приставок на буровой типа G-box;
- сбор телеметрии от разных типов станций контроля с возможностью поддержки WITSML-формата передачи, хранения и загрузки ее на WITSML-сервер недропользователя;
- запатентованный онлайн-распознаватель буровых операций с их визуализацией на мониторе и возможностью дополнения комментариями;
- единый Web-портал мониторинга бурения для всех контролируемых скважин с визуализированными индикаторами отклонений от штатного режима и др.

Технологическая аналитика буровых процессов базируется на встроенном в процесс мониторинга собственного распознавателя технологических операций, ключевых показателях эффективности, выявлении скрытого непроизводительного времени с использованием онлайн-

визуализированных диаграмм (когнитивное восприятие информации – см. рисунок) и самообучающейся нейронной сети (на основе опыта по ранее пробуренным скважинам).

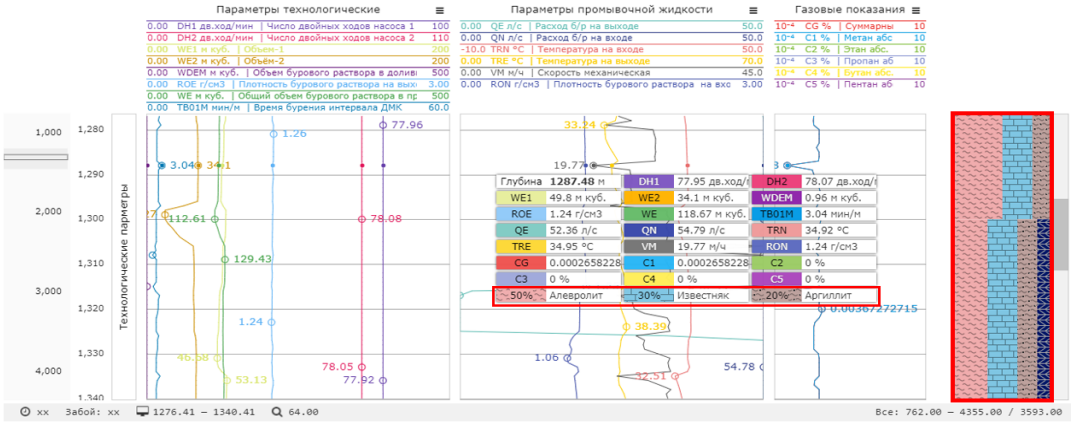


Рис. 1. Мониторинг технологических параметров, промывочной жидкости и газовых показаний

В заключение отметим, что представленные ПК успешно эксплуатируются на буровых объектах РБ, РФ и республики Узбекистан, а также зарегистрированы в национальном центре интеллектуальной собственности (НЦИС) РБ (Свидетельство от 02.09.2024 №1788-КП, Свидетельство от 23.07.2024 №1760-КП и др.).

Литература

[1] *А.Г.Гайван, А.М.Ишмиев, С.Л.Бабицкий, В.С.Глембоцкий, В.П.Пальчунов*. Повышение эффективности геолого-технологического сопровождения проводки сложных скважин с применением единого Web-портала // *НТЖ «Геофорум»*, 2018, №3(49), с.45-51.

[2] *А.Г.Кошелев, В.М.Милинцев, И.Д.Гумнов, М.Г.Рахимов, А.А.Пальчунов, Н.А.Пальчунов, А.М.Федюкович*. «Опыт цифровой трансформации - АО «ССК» и INNERICA реализуют проект платформенной автоматизации супервайзинга бурения» // *«Нефть, газ, НОВАЦИИ»*, 2024, №8, с.17-20.

Структурные сдвиги в машиностроении: анализ быстрорастущих организаций

О. И. Дранко, А. Ф. Резчиков
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
drankooi@ipu.ru, rw4cy@mail.ru

***Аннотация**. Структурные сдвиги в экономике в условиях макроэкономической нестабильности определяют перспективный профиль технологий и продуктов. В данной работе рассмотрена модель выявления и прогнозирования быстрорастущих организаций на примере отрасли машиностроения. В качестве критерия выделения быстрорастущих организаций используется порог среднегодового роста выручки 50% в текущих ценах. Используются методы анализа больших данных для поиска быстрорастущих организаций рассматриваемого сегмента. Выявлено 1,8 тыс. быстрорастущих организаций промышленности России с выручкой более 100 млн.руб. Оценка их роста с помощью сигмоиды (логистической кривой) показывает значительный потенциал роста 150 %. Идентификация параметров логистической кривой проводится с помощью метода наименьших квадратов. Источник данных – открытые данные электронного Правительства России, прежде всего от Федеральной налоговой службы и Росстата.*

I. Введение

В условиях макроэкономической нестабильности важно оценивать рост компаний, формирующих новые технологические и продуктовые тренды.

Один из известнейших экспертов по оценке Г. Симон, особое внимание следует уделять выявлению и изучению так называемых «скрытых чемпионов» – относительно небольших и зачастую малоизвестных компаний, которые, тем не менее, играют ключевую роль в экономике страны или даже мира. В своих работах [1-3] он приводит в пример малые и средние предприятия, составляющие основу немецкой экономики. Г. Симон подчеркивает, что многие крупные корпорации перенимают методы этих организаций, главный принцип которых – увеличение ценности продукции. Например, некоторые компании сознательно ограничивают объемы производства, полагая, что массовость снижает исключительность товара, а значит – и его воспринимаемую ценность.

В России тематика газелей (быстрорастущих организаций) описана в ряде работ Ю.А. Полунина и А.Ю. Юданова [4-5].

Роль влияния быстрого роста выручки на конечный критерий стоимости показан в работах [6-7].

II. Алгоритм поиска информации

В работе использован следующий алгоритм поиска информации об организациях:

1. Скачивание финансовой отчетности организаций. Результат: формирование базы данных с N_1=2 950 тыс. организаций, с финансовой отчетностью за 2019-2024 гг.
2. Чистка данных. Исключение организаций с «неадекватной» отчетностью.
3. Содержательное определение кодов ОКВЭД-2. Для данного анализа использованы коды:
25. Производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования
26. Производство компьютеров, электронных и оптических изделий
27. Производство электрического оборудования
28. Производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки
29. Производство автотранспортных средств, прицепов и полуприцепов
30. Производство прочих транспортных средств и оборудования
4. Выделение списка организаций по кодам ОКВЭД. Выявлено около N_2=55 тыс. организаций.

5. Выделение организаций с полными данными за период. Из-за санкционных ограничений, не все организации представляют финансовую отчетность. Некоторые организации организованы после начала периода анализа или ликвидированы. Выявлено около N_3=27 тыс. организаций.

6. Установление порога по выручке: выручка последнего анализируемого периода не менее S4=100 млн.руб. Выявлено около N_4=10 тыс. организаций, суммарной выручкой (*Revenue*) R_4=8 498 млрд. руб.

7. Определение среднегодовых темпов роста, выделение быстрорастущих организаций (БКО). Выявлено около N_5=1,83 тыс. организаций, с суммарной выручкой R_5=1 485 млрд. руб.

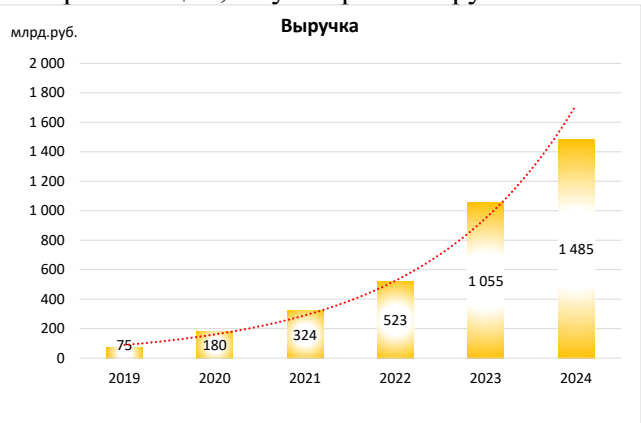


Рис.1. Динамика выручки быстрорастущих организаций машиностроения

Алгоритм прогнозирования [8]

1. Формирование базы данных исходной информации: данных о выручке рассматриваемых организаций.

2. Определение вида прогнозируемой зависимости. Используется сигмоида (рост с насыщением). Для данного анализа – логистическая кривая.

$$F(t) = \frac{L}{1+e^{-k(t-t_0)}}, \quad (3)$$

где $F(t)$ – прогнозируемая функция, L – потенциал роста, k – параметр скорости роста, t – индекс времени, t_0 – год перегиба.

3. Идентификация параметров сигмоиды определяются методом наименьших квадратов для данных 2019-2024 гг. по каждой организации.

4. Прогноз на 2025-2035 гг., по идентифицированным параметрам логистической кривой.

5. Оценка суммарного роста.

III. Данные и расчеты

В качестве исходных данных использована база данных финансовой отчетности российских организаций. Данные относятся к открытым данным, предоставляемым сервисом бухгалтерской (финансовой) отчетности Федеральной налоговой службы России (БФО ФНС) (https://bo.nalog.ru/).

Были проведены расчеты по вышеуказанным алгоритмам по каждой организации. Результаты расчетов по сумме прогнозов отдельных организаций показаны на Рис. 2. Оценка потенциала роста организаций составляет 2,5 раза к уровню 2024 г.

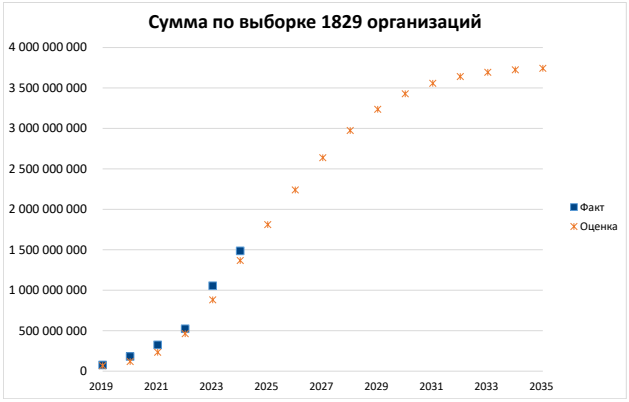


Рис. 2. Оценка роста выручки быстрорастущих организаций машиностроения

IV. Заключение

В ходе исследования были изучены быстрорастущие организации (БРО) машиностроения, динамика развития которых описана с помощью логистической кривой.

с последующей идентификацией параметров.

Для выборки БРО, демонстрирующих рост выручки свыше 50% за последние шесть лет, определены параметры логистической кривой и построен прогноз выручки до 2030 года.

В качестве примера детально рассмотрены расчёты прогнозной выручки для 1,8 тыс. быстрорастущих организаций. Результаты анализа показывают, что при текущих параметрах компания способна достичь выручки порядка 3,8 трлн руб.

Предложенный метод позволяет выявлять и анализировать перспективные компании – «газели», оценивая потенциал их роста с учетом естественных ограничений.

Литература

[1] *Симон Г.* Скрытые чемпионы XXI века: финансирование, организация и деловое окружение // *Российский журнал менеджмента*. – 2013. – Том 11. № 3. – с.129-152.

[2] *Симон Г.* Скрытые чемпионы 21 века. Стратегия успеха неизвестных лидеров мирового рынка // М.: Кнорус, – 2015. – 240 с.

[3] Симон Г. *Скрытые чемпионы – новые правила игры в век Китая* // М.: Библос, – 2021. – 310 с.

[4] *Юданов А.* «Быстрые» фирмы и эволюция российской экономики // Вопросы экономики – 2007. – №2. – с.85-100. https://doi.org/10.32609/0042-8736-2007-2-85-100.

[5] *Полунин Ю.А., Юданов А.Ю.* Темпы роста компаний и заполнение рыночной ниши // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 2 (179). – с.101-112.

[6] *O. Dranko*, "Model of the Impact of Rapid Growth on Enterprise Value," 2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2024, pp. 139-143, doi: 10.1109/SUMMA64428.2024.10803871.

[7] *O. I. Dranko, A. F. Rezchikov, A. D. Tsvirkun, V. A. Kushnikov, A. S. Bogomolov and I. A. Stepanovskaya*, "Fast-Growing Companies Development Control," 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 151-154, DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554187.

[8] *Дранко О.И., Тароян К.К.* О модели прогнозирования выручки организации с быстрым ростом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2023. – № 4. – С. 66-75. DOI: http://dx.doi.org/10.14529/ctcr230407.

Обзор математических проблем, несовместимостей и противоречий в прикладных моделях оптимизации планирования и управления в нефтегазовой отрасли

П. А. Шлепаков[1,2]

[1]*ООО «Алеф.Софт», г. Москва, Россия,*

[2]*Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия,*

pshlepakov@yandex.ru, shlepakovpa@mgri.ru

Аннотация. *Представлен обзор проблем и противоречий в математических моделях, а также анализ их практических последствий при эксплуатации и интеграции критичных для бизнеса прикладных систем планирования и управления в нефтегазовой отрасли. Анализируются системы зарубежных вендоров (Bonner&Moor, Honeywell, AspenTech, SAP, Microsoft, Oracle, IBM), которые автор внедрял, сопровождал, развивал, интегрировал десятки лет и/или прошел сертифицированное вендорами обучение. Для анализа и устранения проблем предложена единая корректная математическая модель, которую автор развивает и внедряет с 1977 года. В ней обобщаются условия (ограничения и целевые функции) широкого спектра задач для различных непрерывных, дискретных и дискретно-непрерывных процессов и производств, логистики, цепей поставок, управления проектами и др. Модель реализована в едином смешанном решателе Алеф-куб, как частные случаи модели решены задачи разного уровня: стратегического и инвестиционно-финансового, объемного и календарного планирования, сведения балансов, оперативного и диспетчерского управления, проектирования и управления проектами и др. Обзор представляет интерес для специалистов в области математического моделирования и может быть полезен для руководителей, заказчиков, пользователей и разработчиков прикладных решений.*

I. Введение

Рассмотрены проблемы математических моделей, реализованных в критичных системах планирования и управления объектами, процессами и проектами (далее – системы) на примере нефтегазовой отрасли. Для анализа проблем прикладные модели представлены как *частные случаи* общей корректной математической модели [1-3] и решены *единым сервисом* Алеф-куб [4] для различных объектов: от месторождения, цеха, завода (НПЗ/НХЗ), морского терминала до доставки топлив с нефтебаз на АЗС, включая типовые задачи по стандарту ISA-95 класса ERP, APS, MES, SCM, DPU, VSR, EAM, PM, HRM и др. [5].

II. Рамки обзора и источники информации

Системы западных вендоров коммерческие, проприетарные, обычно публикуются «истории успеха». Обзор ограничим проектами с участием автора, а также совещаниями [6]:

- С 1977г. – разработка и внедрение моделей и методов оптимизационного календарного планирования нефтепереработки, химии, нефтехимии и др. [2-3].
- С 1995г. – сопровождение и развитие комплекса систем планирования (КСП) Группы «ЛУКОЙЛ», в т.ч. планирование поставок нефти и нефтепродуктов, переработки на НПЗ, сведение балансов, управление проектами, интеграция (Enterprise Service Bus, ESB), СУБД и др. разработки Bonner&Moor [7], Honeywell [8-10], AspenTech [11], SAP [12], Oracle, Microsoft, IBM и др., и/или сертифицированное этими вендорами обучение, общение с их экспертами; с 2017г. – поддержка всех производственных систем Группы.
- С 2017г. – обсуждение с коллегами и руководителями подразделений других нефтяных и IT компаний – Газпромнефть, Башнефть, Роснефть, Газпром, Минэнерго [5], 1С [13].

III. Математические проблемы в прикладных моделях и системах

Внутренние проблемы систем обусловлены некорректностью данных, математических моделей и методов решения, а также возможной «суперпозицией» этих проблем [7-13]:

Отсутствие режимов анализа и исправления противоречий *исходных данных*, восполнения недостающих данных, опций учета погрешности измерений, ошибок округления;

1. Использование экспертных оценок и *эвристических правил*, заимствованных из прошлого опыта и применяемых вне контекста текущих условий; подмена оптимизационных методов имитационным моделированием, – симуляцией заданных пользователем решений;
2. Неадекватность модели реальной задаче: игнорируются *значимые ограничения* и критерии – нелинейные, дискретные, предыстория, отсутствует многокритериальная оптимизация, задача «подгоняется» под доступные пакеты линейного программирования (LP, MILP);
3. Замена динамических задач календарного планирования *серией статических*, связанных лишь переходящими значениями фазовых переменных, «скользящей» детализацией [14];
4. Непрозрачность и неудобства для пользователя: *отсутствие объяснений*, обоснований и оценки качества решения, сравнительного анализа решений, а десятки форм ввода-вывода при слабой параметризации лишают пользователя рычагов *влияния на модель*.

Следствия: трудоемкое и дорогостоящее внедрение, сопровождение, тиражирование, масштабирование, развитие, проблемы переиспользования систем даже для похожих задач.

Проблемы моделирования взаимодействия объектов и процессов в пространстве и времени добавляются к внутренним [7-16]:

1. Данные неоднородны по смыслу, *несовместимы* по уровням детализации объектов и задач, по форматам представления и разрядности;
2. Невозможна *корректная* композиция, декомпозиция, агрегация и детализация моделей разных объектов и процессов, и даже разных задач для одного и того же объекта, например, планирования [8] и сведения материального баланса [9-10];
3. Модели и решатели *разные* для симуляции и оптимизации; для дискретных и непрерывных, агрегированных и детальных, статических и динамических задач; для планирования и оперативного управления поставками сырья, производством, отгрузками, финансами и проектами; для мониторинга и план-факт анализа; для обучения персонала и тренажеров;
4. Стандартизация и *унификация* данных, моделей и решателей не востребованы, а стандарты разработки, тестирования и интеграции – многотомные и противоречивые [15-16].

Следствия применения «зоопарка» некорректных моделей:

Жизненный цикл объекта «разорван» – требуется «стыковать» решения несовместимых систем инвестиционного, стратегического, бюджетного, финансового и операционного планирования, проектирования, мониторинга и управления проектом, бухгалтерского учета, оптимизации бизнес-процессов, производственного объемного и календарного планирования, сведения балансов, диспетчерского управления, обучения персонала;

1. Проекты *интеграции* длительные, дорогие, уникальные, требуют привлечения вендоров; системы несовместимы даже на уровне базы данных, цифрового двойника и матрицы LP;
2. Надежность комплекса систем низкая, резервирование элементов не помогает, требуется централизованная система *мониторинга отказов* и ручное вмешательство;

3. Угрозы информационной безопасности (ИБ) умножаются из-за: расширения *периметра защиты* от вирусов и внешних атак, от утечек данных; усложнения политик, контроля прав доступа, шифрования, мониторинга действий сотрудников; увеличения штата ИБ.

Причины проблем – исторические, экономические, технические и математические.

IV. Концепция и направления развития общей модели оптимального управления

В основе модели – абстрактные ресурсы $R(t)$ и агенты $A(t) \subset R(t)$, выполняющие на горизонте времени $t \in \mathbb{T}$ элементарные действия с ресурсами: емкости $x(t)$ – хранение и буферизацию; операции $z(t)$ – включение-отключение, преобразование, разветвление; потоки $p(t)$ – перемещение. В [1] формализована задача оптимизации и поддержания баланса целевых и одновременно ограниченных зависимых ресурсов $F(\mathrm{A}(t)) \subset R(t)$:

$$F(A(t)) \lessgtr/\cong/\to 0 \text{ и/или } \to min/max,\ t \in \mathbb{T},\ \ A(t) = \{x(t), z(t), p(t)\} \qquad (1)$$

Условия (1) могут описывать зависимость одних ресурсов от других явно и неявно, могут быть активны в отдельные моменты $t^* \in \mathbb{T}$, в интервалах $\mathbb{T}^* \subseteq \mathbb{T}$, на всем горизонте $\mathbb{T}$.

Недостаток: построить и настроить свою прикладную подмодель из агентов непросто, требуются знания и опыт. Для автоматизации создания моделей в Алеф-куб предлагается:

- Анализ и синтез гиперграфа (A, F) общей модели совместно «сверху-вниз» и «снизу-вверх» на основе явных и неявных зависимостей сложных агентов F от элементарных A;
- Обучение нейронных сетей на типовых решениях и схемах [5]: для создания моделей по тексту технического задания и по изображению технологической схемы объекта; для настройки параметров Алеф-куб; для речевого ввода-вывода.
- Реализация гиперкуба типовых объектов, задач, подзадач, процессов и регламентов [1].

V. Заключение

«Зоопарк» систем и трудно, и дорого использовать, поддерживать, масштабировать, внедрять, интегрировать, тиражировать, развивать, обеспечивать надежность и безопасность.

Единая пара модель-решатель [1-3] позволяет перейти от разрозненных систем [7-14] к единому цифровому сервису Алеф-куб [4] для *согласованного* планирования и управления [5]:

- множеством различных объектов, процессов и проектов, соединив оптимизационное производственное, финансовое планирование и отчетность в едином интерфейсе;
- жизненным циклом предприятия от проектирования до эксплуатации и обучения;
- корпорацией, группой компаний из разных отраслей, цепями поставок и логистикой.

Автор благодарен Мусе Сосламбекову за полезное обсуждение материала.

Литература

[1] *P. Shlepakov*, "General Mathematical Model of Optimal Planning, Scheduling and Control and a Hypercube of Its Special Cases", *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874974.

[2] *Шлепаков П.А.* Задачи управления структурой сложной системы применительно к календарному планированию нефтепереработки // *Автоматизация нефтеперерабатывающих производств* / Сб. научных трудов ЦНИИ Комплексной автоматизации (ЦНИИКА). М.: Энергоиздат, 1982. – С.11-16.

[3] *Шлепаков П.А.* Математические модели управления многовариантными производствами (структурой сложных систем) // Математическое моделирование объектов управления / *Сб. научных трудов. М.: НПО ЦНИИКА*. 1991. С.86-106.

[4] *Шлепаков П.А., Шлепаков С. П.* Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016612271 ФИПС РФ. Aleph-cube - Scheduling Simulator & Optimizer: № 2015663363. – EDN OWRDZK.

[5] Поиск по ISA-95 и видам деятельности - Aleph-cube Platform: AGI Modeling & Optimizing Solver. URL: *https://alephcube.site/solutions_by_isa95/*. (Дата обращения: 27.05.2025).

[6] Презентации - Aleph-cube Platform: AGI Modeling & Optimizing Solver. URL: *https://alephcube.site/ac_presentations/*. (дата обращения: 27.05.2025).

[7] *Joe F. Moore*. Creating Profit with Computers: My Life as CEO of Bonner & Moore Associates. IEEE Annals of the History of Computing, Vol.: 25, 3, July-Sept. 2003. DOI: 10.1109/MAHC.2003.1226654, – P. 30-47.

[8] *А. С. Хохлов, Д. Ю. Мишутин, Е. С. Баулин*. Реализация систем класса APS для НПЗ/НХК и их объединений // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): Труды 16 международной конф., Москва, 26–28 сентября 2023 года. – Москва: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. – С. 94-103. – EDN FOYTFF.

[9] *Кувыкин, В. И.* Построение моделей бизнес-процессов в системах автоматизации НПЗ / В. И. Кувыкин, М. Ю. Петухов // *Автоматизация в промышленности*. – 2012. – № 10. – С. 39-42. – EDN NRAXLK.

[10] Автоматизация процесса согласования материального баланса на нефтеперерабатывающем предприятии - система Production Balance / *М. Ю. Петухов, А. Р. Закиев, П. Е. Бородин, С. Б. Артемьев* // *Автоматизация в промышленности*. – 2014. – № 8. – С. 22-28. – EDN SJFRKF.

[11] AspenTech Product Portfolio. [Online]. Available: *https://www.aspentech.com/en/products/full-product-listing*.

[12] SAP Library - Production Planning and Detailed Scheduling (PP/DS), Heuristics. [Online]. Available: *https://help.sap.com/doc/saphelp_snc70/7.0/en-US/44/c1703713bf277ee10000009b38f8cf/frameset.htm*.

[13] 1С: Облачная карта решений, редакция 1.0 (1С: Предприятие). *https://platform.demo.1c.ru/solutionscloud/ru/*

[14] *Баулин Е.С., Боронин А.Б., Хохлов А.С.* Скользящая детализация текущего плана деятельности НПЗ/НХК и актуализация оптимизационных моделей планирования // *Автоматизация в промышленности*. 2012. №10. С. 8-14. EDN: PEMOKJ

[15] Standards for Automation – ISA. [Online]. Available: *https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards*.

[16] The TOGAF Standard, 10th Edition. [Online]. Available: *https://www.opengroup.org/togaf/10thedition*.

Digital ecosystem and corporate production management mechanism

V. Tsyganov
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia,

I. Introduction

We consider the model of a digital control of output in a large production corporation, having a branch department headed by the head (in short, the Head) with the adviser (the Adviser). This branch department includes subordinate plant headed by the Director. The corporation's output is controlled by the top director (abbreviated Owner).

Production output is affected by external influences. When making decisions, the Head knows exactly the outsourcing outputs at the branch department level. But he does not know the maximum production output of the plant at random external influences. The Director knows exactly this output when making decisions. The Owner does not know production output in the plant and the outsourcing outputs of the branch department. Thus, the Head can manipulate the branch department's output to influence the Owner's decisions in order to increase his own remuneration. Therefore, the Owner needs to learn how to control the Head so that the output in the branch department is maximized under random external influences. Neither the Adviser nor the Head knows the output in the plant. Thus, the Director also can manipulate the output of the plant in order to influence the Head decisions about his own remuneration. Therefore, the Head needs to control the Director in such a way as to decrease the output in the plant.

Let's illustrate the described problem on the example of the application of AI in the maintenance of railway operations [17]. One of the areas of such application is service maintenance and repair of rolling stock [18]. With the current practice of managing the output of such maintenance and repairs in a corporation with branch departments and plants, the branch head receives incentives if the branch output do not exceed the established norm. First, the Head obtain incentives if the branch department output is not smaller than the established norm. Therefore, the higher the norm, the more difficult it is to get incentives. Secondly, the norm in the next period is decreased by a certain percentage of the output achieved today. This is the essence of the principle of output planning “from the level that has been achieved”, which is often used in large-scale industrial systems [11]. Accordingly, the higher is output today, the higher will be future norms.

Consequently, in our model, the Head and the Director may not be interested in decreasing output below the norms (because the higher the norms for the future, the more difficult it is to get future incentives). Thus, the problem arises of the lack of interest of the Head and the Director to use the opportunities to decrease their output. To solve it, it is necessary to motivate both the Head and the Director to increase their output.

II. Advisory mechanism

The goal of the Head is to increase plant outputs to their maximum. Lemma: Advisory mechanism is sufficient for increasing plant output in every period.

III. Complex mechanism

Suppose the Owner allows an inexperienced Head to use the services of an Adviser. Combining advisory mechanism and owner’s mechanism, we obtain complex mechanism.

Theorem: Complex mechanism is sufficient to maximize total branch output in each period.

IV. Example: control of modernization of freight railway platforms

Let's consider an example of using derived approach to control the modernization of freight rail platforms in JSC “Carriage Repair Corporation”, which has 3 branches. The head of one of these branches can be considered the prototype of the Head. The top manager of this JSC is the prototype of the Owner. He must self-learn and encourage the Head to increase branch output. Director of a plant from this branch is the prototype of the Director.

As follows from what was said in paragraph 3, to motivate the Head to increase total branch output, it is enough for the Owner to use complex mechanism. So, the Owner monthly monitors total branch output of modernization of cargo rail platforms. Required branch output level (forecast) also is measured in thousands of modernized platforms in month *t*. The Owner monthly determines a level of the Head. In the event that the Head takes second level, he receives a bonus. This encourages the Head to increase branch output. This example illustrates the simplicity and transparency of derived approach to control of total branch output.

V. Conclusions

The model of digital ecosystem of corporate production management in a corporation, carried out by its Owner, is considered. The head of the branch of the corporation (Head) controls the subordinate plant headed by the Director. A corporation's branch output is affected by random external influences. The Head knows exactly the maximum possible volume of outsourcing production at the branch level. But he does not know the maximum possible volume of production (potential) in the plant. The Adviser helps the Head to eliminate this uncertainty. For his part, the Director knows exactly plant's potential. At the same time, the Owner does not know this potential, nor the possibilities of outsourcing. Thus, the Head can manipulate branch output to influence the decisions of the Owner in order to increase his own promotion. Therefore, the Owner needs to learn how to control the Head in order to maximize branch output. Similarly, the Director can manipulate plant's output to influence the Head's decisions about his own denomination. Therefore, the Head needs to control the Director in order to increase plant's output. A complex control mechanism has been found, in which total branch output is maximal. The use of such a mechanism is illustrated by the example of the modernization of freight railway platforms.

Prospects for research in this area are associated with the use of more complex machine learning procedures in the corporation's hierarchical management system.

References

[1] *A. Kossiakoff, W. Sweet, S. Seymour, S. Biemer*, Systems engineering. principles and practice John Wiley, New York, 2011.

[2] *P. Ceravolo, A. Azzini, M. Angelini*, J. of Data Semantics 7, 65−75. 2018.

[3] *X. Wu, X. Zhu, G.-Q. Wu*, IEEE Trans. Knowledge Data Engineering 26(1), 97–107. 2014.

[4] *A. Fradkov*. Early history of machine learning. Proc. of the 21st IFAC World Congress, 3439. 2020.

[5] *D. Bertsekas*, Reinforcement learning and optimal control (Athena Scientific, Massachusetts, 2019.

[6] *R. Sutton, A. Barto*, Reinforcement learning: an introduction (MIT Press, Massachusetts, 2018.

[7] *B. Recht*. Reflections on learning-to-control renaissance. Proc. of the 21st IFAC World Congress, 4707. 2020.

[8] *S. Auster*, Games and economic behavior 82, 503-521. 2013.

[9] *B. Schipper*, Mathematical Social Sciences 70, 1-9. 2014.

[10] *V. Burkov, V. Kondratiev, N. Korgin, D. Novikov*, Mechanism design and management (NOVA Publishers, New York, 2013.

[11] *V. Tsyganov*. Learning mechanisms in digital control of large-scale industrial systems", in Proc. of Global Smart Industry Conf.. 2018.

[12] *V. Tsyganov*. Corporate productivity adaptive mechanisms. Proc. of Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. 2020.

[13] *V. Tsyganov*, Procedia CIRP 84, 1088-1093. 2019.

[14] *V. Tsyganov*, IFAC PapersOnLine 54(2), 75-80. 2021.

[15] *V. Tsyganov*. Decision making and learning in wagon-repairing. Proc. of conf. on Management of Large-Scale System Development. 2019.

[16] *V. Tsyganov*, Informatics and cybernetics in intelligent systems 228, 466-475. 2021.

[17] *M. Pappaterra*, Communications in Computer and Information Science, 1656-1669 . 2022.

[18] *A. Alexandrov, D. Bannikov, N. Sirina*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 403, 012193. 2019.

[19] Annual report of Carriage Repair Company - 3, 7 May 2018, *https//raex-a.ru/annual_reports/reports/2017_ vrk_3.pdf*

Драйверы внедрения цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ: российский и зарубежный опыт

О. В. Кудрявцева[1,2], М. А. Кудрявцева[2]
[1]Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,
[2]Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Астрахань, Россия,
kudryavtzevaov@mail.ru

***Аннотация**. В современном мире повышение уровня занятости инвалидов является весомой проблемой как в России, так и за границей. Эффективное внедрение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ способствует созданию равных возможностей и устранению барьеров, мешающих их интеграции в рынок труда.*

I. Введение

Хотя профессиональное образование становится все более доступным для людей с инвалидностью и ОВЗ, их дальнейшее трудоустройство сопряжено с серьезными трудностями [1]. Лица с ОВЗ сталкиваются с трудностями в конкуренции с соискателями, не нуждающимися в адаптированных рабочих местах.

Согласно распоряжения Правительства РФ от 02.09.2024 N 2401-р <Об утверждении Концепции по повышению уровня занятости инвалидов в Российской Федерации на период до 2030 года, плана мероприятий по ее реализации> инвалид – это человек, имеющий нарушение здоровья, которое характеризуется стойким расстройством функций организма, вызванным заболеваниями, последствиями травм или дефектами. Данные нарушения приводят к ограничению жизнедеятельности и, как следствие, необходимости предоставления социальной защиты. Трудоустройство инвалида – это комплекс мероприятий, направленных на обеспечение права инвалидов на труд, включающий профессиональную подготовку, создание доступных рабочих мест и поддержку в процессе трудоустройства [2].

В России признается право каждого инвалида (за исключением случаев серьезных ограничений) на получение профессии и трудоустройство. Для реализации этого права в регионах проводятся мероприятия, направленные на повышение конкурентоспособности инвалидов и мотивацию работодателей [3].

Однако, существующая система поддержки занятости инвалидов (квотирование, специальные рабочие места, сопровождение) имеет ряд недостатков:

- работодатели часто не выполняют установленные квоты;
- предлагаемые рабочие места не всегда соответствуют квалификации и возможностям инвалидов;
- не хватает эффективных механизмов стимулирования работодателей к трудоустройству инвалидов.

Как в России, так и за границей растет осознание необходимости инклюзивности и равных возможностей для всех, что создает общественное давление на компании и правительства. Антидискриминационные законы и программы поддержки трудоустройства лиц с ОВЗ стимулируют работодателей к поиску инновационных решений. Появление новых и доступных цифровых технологий, таких как AI, машинное обучение, роботизация, ассистивные технологии, делает трудоустройство лиц с ОВЗ более реальным и эффективным. Компании начинают осознавать, что наем лиц с ОВЗ может приносить экономическую выгоду благодаря повышению производительности, инновациям и улучшению имиджа бренда. Цифровые технологии позволяют многим лицам с ОВЗ работать удаленно, что расширяет географию поиска работы и снимает ограничения, связанные с физической мобильностью. Интернет и цифровые платформы

предоставляют лицам с ОВЗ доступ к информации о вакансиях, образовании и поддержке, а также облегчают коммуникацию с работодателями и коллегами.

К российские драйверам внедрения цифровых технологий в сферу трудоустройства лиц с ОВЗ относятся:

- государственные программы поддержки: Федеральные и региональные программы, направленные на создание рабочих мест для лиц с ОВЗ, стимулируют использование цифровых технологий;
- развитие социальной инфраструктуры, т.е. создание специализированных центров занятости и реабилитационных центров, оснащенных цифровым оборудованием, способствует подготовке и трудоустройству лиц с ОВЗ;
- акцент на импортозамещение, т.е. стремление к разработке и внедрению отечественных цифровых решений для лиц с ОВЗ, что стимулирует инновации в этой области;
- в условиях недостаточной доступности физической инфраструктуры, цифровые технологии становятся особенно важным инструментом для обеспечения трудоустройства лиц с ОВЗ;
- в связи с недостаточной осведомленность работодателей, информационные кампании и образовательные программы, направленные на повышение осведомленности работодателей о преимуществах найма лиц с ОВЗ и возможностях цифровых технологий, играют важную роль.

Зарубежный опыт трудоустройства лиц с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) демонстрирует разнообразие подходов и стратегий, направленных на повышение их занятости и интеграцию в рынок труда [4]. Некоторые ключевые аспекты и примеры из различных стран представлены на рисунке 1.

К зарубежным драйверам внедрения цифровых технологий в сферу трудоустройства лиц с ОВЗ относится:

- в развитых странах существует более развитая система социальной поддержки лиц с ОВЗ, что позволяет им более активно использовать цифровые технологии для трудоустройства [5];
- некоммерческие организации играют важную роль в разработке и внедрении цифровых технологий для лиц с ОВЗ, а также в advocacy и продвижении инклюзивных практик;
- инклюзивное образование позволяет лицам с ОВЗ получить необходимые навыки и знания для успешного трудоустройства в цифровой экономике;
- существует широкий выбор ассистивных технологий, которые помогают лицам с ОВЗ преодолевать барьеры в трудовой деятельности;
- в развитых странах активно используются AI и машинное обучение для автоматизации рутинных задач, что позволяет лицам с ОВЗ сосредоточиться на более сложных и творческих задачах.

К основным примерам внедрения цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ относятся:

- онлайн-платформы для поиска работы [6], т.е. специализированные платформы, адаптированные для лиц с ОВЗ, с фильтрами по типу инвалидности и требуемым адаптациям;
- виртуальные тренажеры и симуляторы, необходимые для подготовки к различным профессиям и развития необходимых навыков;
- ассистивные технологии, т.е. программы для чтения с экрана, синтезаторы речи, системы управления компьютером с помощью голоса или глаз;
- платформы для удаленной работы с интегрированными инструментами для коммуникации и совместной работы;

- AI-powered инструменты для автоматического перевода текста в речь, распознавания жестов и других вспомогательных функций.

Рис. 1. Ключевые аспекты и примеры при трудоустройстве из различных стран

Таким образом, внедрение цифровых технологий при трудоустройстве лиц с ОВЗ – это комплексный процесс, который требует совместных усилий государства, бизнеса, НКО и самих лиц с ОВЗ. Важно учитывать как общие тенденции, так и специфические особенности каждой страны, а также разрабатывать и внедрять инновационные решения, которые максимально соответствуют потребностям лиц с ОВЗ. Зарубежный опыт демонстрирует, что успешное трудоустройство лиц с ОВЗ требует системных усилий, направленных на создание равных возможностей и устранение барьеров, мешающих их интеграции в рынок труда. Россия, перенимая передовой зарубежный опыт, должна адаптировать его к своим реалиям, активно развивая отечественные цифровые решения и социальную инфраструктуру.

Литература

[1] *Старобина, Е. М.* Проблемы трудоустройства выпускников профессиональных образовательных организаций с инвалидностью / *Е. М. Старобина* // *Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина*. – 2022. – № 2. – С. 436-447. – DOI 10.35231/18186653_2022_2_436. – EDN EABLCL.

[2]. *Кураева, Л. Н.* Российская практика реализации прав инвалидов на труд и занятость / *Л. Н. Кураева, Ф. И. Мирзабалаева* // *Экономика труда*. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 843-858. – DOI 10.18334/et.10.6.117865

[3]. Оценка и основные подходы к содействию занятости инвалидов на российском рынке труда / *Ф. И. Мирзабалаева, С. Е. Пашкова, Г. В. Антонова, А. В. Анфалова* // *Экономика труда*. – 2024. – Т. 11, № 11. – С. 1911-1928. – DOI 10.18334/et.11.11.121937

[4]. *Мирзабалаева, Ф. И.* Зарубежный опыт государственного регулирования и интеграции инвалидов в сферу занятости / *Ф. И. Мирзабалаева, С. Е. Пашкова* // *Экономика труда*. – 2024. – Т. 11, № 10. – С. 1691-1712. – DOI 10.18334/et.11.10.121892

[5] *Савощикова, Е. В.* Лица с ОВЗ и инвалиды - опыт правового регулирования по вопросам трудоустройства и организации бизнеса в зарубежных странах / *Е. В. Савощикова, Л. Р. Гардашханова* // *Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков : сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции,* Москва, 30 ноября 2022 года. – Москва: Алеф, 2022. – С. 190-196. – DOI 10.34755/IROK.2022.36.43.019. – EDN BJUOUQ.

[6]. *О.В. Кудрявцева, М.А. Кудрявцева*. Драйверы внедрения цифровых технологий в управление кадровым обеспечением региона //*Материалы VIII Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2024).* (1-5 октября 2024 г., Владикавказ, Россия) 2024. С..120-123.

Секция 4

Материалы для инфокоммуникационных систем

Materials for infocommunication systems

Applying multi-objective genetic algorithm (MOGA) to optimize synthesis parameters of dielectric Sol-Gel coatings for microelectronics

V. V. Vaskievich[1], D. L. Kovalenko[1], Yu. V. Nikityuk[1],
V. E. Gaishun[1], K. D. Danilchenko[1], I. Yu. Aushev[2]
[1]Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus,
[2]University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
vaskevich@gsu.by, dkov@gsu.by, nikitjuk@gsu.by, vgaishun@gsu.by

Abstract. *This study optimized the parameters of silicon dioxide coating formation using a genetic algorithm. The coatings were prepared via the sol-gel method. Experiments were conducted using a face-centered central composite design, with the following input parameters: the ratio of silicon organic compounds in the initial sol, spin-coating rotation speed, and annealing temperature. The output characteristics included coating thickness, refractive index, and leakage currents of the sol-gel coatings. The influence of coating formation parameters on these characteristics was evaluated. The coating process optimization was performed using a genetic algorithm with the objective of minimizing leakage currents for sol-gel coatings of specified thickness.*

I. Introduction

The advancement of microelectronics, driven by the demand for device miniaturization and enhanced reliability, necessitates the improvement of dielectric coatings. While the sol-gel method offers flexibility in tailoring material properties, it faces challenges in optimizing multiple interdependent parameters. Traditional approaches based on factor screening prove insufficiently efficient. The application of genetic algorithms provides an effective solution to these problems, reducing both time and costs associated with such research [1]. The use of genetic algorithms in developing new sol-gel materials will enable efficient solutions for microelectronics. Previous studies [2–4] have demonstrated the successful optimization of process parameters using genetic algorithms. The present research employed the MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) module of ANSYS DesignXplorer to optimize the parameters of sol-gel coating formation for microelectronic applications.

II. Determination of optimal parameters for sol-gel coating formation

In order to examine how the initial concentration ratio of methyltriethoxysilane (MTES) to tetraethyl orthosilicate (TEOS) affects the properties of the resulting sol-gel coatings, a series of film-forming solutions was prepared with different MTES:TEOS mass ratios (5:3, 4:3, and 1:1). The film-forming solutions were prepared as follows: specified quantities of methyltriethoxysilane ($CH_3Si(OC_2H_5)_3$) and tetraethyl orthosilicate ($Si(C_2H_5O)_4$) were mixed with a solvent and catalyst. During this process, the solution temperature increased due to hydrolysis and polycondensation reactions. The obtained solutions were subsequently aged at ambient temperature (22±2) °C for 2–3 days to ensure complete maturation.

To study the effect of deposition conditions, the prepared film-forming solution was applied to KDB-4 grade silicon wafers. The spin-coating process typically consists of four stages: solution application, spreading, excess solution removal, and solvent evaporation. The deposition parameters were optimized using an Apogee Cee 200X spin coater (Cost Effective Equipment, USA), which enables liquid solution deposition on flat substrates at rotational speeds ranging from 10 rpm to 12,000 rpm. Following deposition, the wafers were transferred to a programmable SNOL 8.2/1100 muffle furnace for air annealing. Three annealing temperatures were selected for investigation based on their ability to produce homogeneous coatings: 250°C, 325°C, and 400°C [5-8]. The thermal treatment protocol featured a constant heating rate of ≈3.5°C/min, followed by a 60-minute isothermal hold at the target temperature.

Refractive indices and thicknesses of the fabricated samples were measured with an LEF-757 laser ellipsometer (Institute of Semiconductor Physics, Russia) by taking five-point measurements across each wafer followed by data averaging, while current-voltage characteristics were evaluated using a Semishare E6 four-point probe station (Semishare, China) coupled with a GSM7-20H10 parametric analyzer (Good Will Instrument, China).

The study investigating the influence of initial composition and processing parameters on sol-gel coating properties was conducted using the Ansys DesignXplorer module. A central composite experimental design was implemented for three factors (P1–P3): where P1 represents the initial methyltriethoxysilane to tetraethyl orthosilicate ratio, P2 is the spin-coating rotational speed, and P3 denotes the annealing temperature. According to the experimental design, tests were performed for 15 input parameter combinations (see Table 1). The following output parameters characterizing the sol-gel coatings were determined: coating thickness (h), leakage currents (I1, I2, I3) at 50 V, 100 V, and 150 V respectively, and refractive index (n). Thus, the research object model consisted of response functions relating output parameters (h, I1, I2, I3, n) to input factors (K, ω, T). For response surface generation, a nonparametric regression method implemented in the DesignXplorer module of ANSYS Workbench was employed [9].

Table 1. Experimental Design and Results

N	*P1* *K*	*P2* *ω, rpm*	*P3* *T, °C*	*h,* *nm*	*I1,* *nA*	*I2,* *nA*	*I3,* *nA*	*n*
1	*1*	*3000*	*325*	*333.56*	*3.7*	*44.1*	*219.8*	*1.291*
2	*1.3*	*3000*	*325*	*328.70*	*2.5*	*27.0*	*147.7*	*1.303*
3	*1.67*	*3000*	*325*	*324.17*	*4.4*	*58.5*	*211.4*	*1.35*
4	*1.3*	*3000*	*250*	*296.42*	*2.6*	*29.1*	*163.8*	*1.354*
5	*1.3*	*3000*	*400*	*284.43*	*2.5*	*27.3*	*139.2*	*1.392*
6	*1.67*	*1500*	*400*	*782.47*	*3.1*	*49.8*	*144.6*	*1.395*
7	*1*	*4500*	*400*	*178.29*	*3.2*	*47.5*	*207.1*	*1.398*
8	*1*	*1500*	*400*	*714.28*	*2.7*	*42.8*	*184.7*	*1.402*
9	*1.3*	*1500*	*325*	*726.70*	*2.1*	*20.6*	*99.6*	*1.407*
10	*1.67*	*4500*	*400*	*235.81*	*4.1*	*55.0*	*198.2*	*1.407*
11	*1*	*4500*	*250*	*194.97*	*4.8*	*46.6*	*239.5*	*1.409*
12	*1.67*	*1500*	*250*	*764.16*	*3.3*	*52.2*	*171.5*	*1.412*
13	*1.3*	*4500*	*325*	*164.03*	*2.3*	*24.6*	*112.0*	*1.413*
14	*1.67*	*4500*	*250*	*223.81*	*4.0*	*54.2*	*171.2*	*1.413*
15	*1*	*1500*	*250*	*713.35*	*5.0*	*50.8*	*215.3*	*1.414*

The influence of input parameters on the output parameters that define sol-gel coatings was assessed. The centrifuge rotation speed has the greatest impact on the film thickness and refractive index values. The extent of leakage currents is primarily determined by the initial ratio of MTES to TEOS. Figure 1 illustrates the relationship between the leakage current I1 and the initial ratio of MTES to TEOS – P1, as well as the centrifuge rotation speed P2.

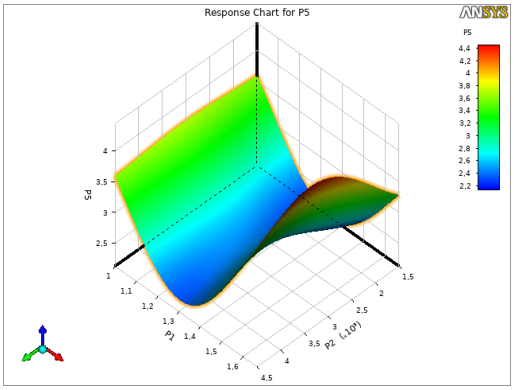


Fig. 1. Leakage current I1 as a function of sol-gel coating formation parameters

The optimization of sol-gel coating formation parameters was performed using the multi-objective genetic algorithm (MOGA) with an initial population size of 100 individuals and 100 individuals per iteration.

Multi-objective optimization was performed using the following criteria: minimization of leakage currents and maximization of refractive index values. The optimization results are presented in Table 2, with experimentally obtained parameter values shown in parentheses. The maximum relative error of the genetic algorithm predictions for output parameters did not exceed 10%.

Table 2. Optimization results

P1 *K*	*P2* *ω, rpm*	*P3* *T, °C*	*h,* *nm*	*I1,* *nA*	*I2,* *nA*	*I3,* *nA*	*n*
1,28	*2977*	*378*	*300*	*2.4*	*26.1*	*141.9*	*1.356*
			(309)	*(2.2)*	*(25.1)*	*(139.5)*	*(1.331)*

III. Conclusion

This study employed the multi-objective genetic algorithm (MOGA) from the DesignXplorer module to determine optimal parameters for producing sol-gel coatings that satisfy essential criteria for dielectric coatings in microelectronics applications, specifically achieving target thickness values while maintaining minimal leakage currents.

References

[1] *Emelyanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M*. Theory and practice of evolutionary modeling. Moscow: FIZMATLIT, 2003. 432 p.

[2] *Krasnovskaya S.V., Naprasnikov V.V*. "Review of optimization algorithms capabilities for finite element modeling of compressor-condenser units". Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series, No. 2, 2016, pp. 92–98.

[3] *Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, and I. Y. Aushev*, "Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass", *J. Opt. Technol. 89*, 2022, pp. 121–125.

[4] *Y. Nikitjuk, A. Serdyukov*, "Determination of the Parameters of Controlled Laser Thermal Cleavage of Crystalline Silicon Using Regression and Neural Network Models", Crystallography Reports, Vol. 68, №. 7, 2023, pp. 195–200.

[5] *V.V. Vaskevich, V.E. Gaishun, D.L. Kovalenko, Sungwook Mhin, at all*, "Dielectric sol-gel coatings based on silica dioxide for surface planarization of integral microcircuits", Problems of Physics, Mathematics and Technics, Issue 4(45), 2020, pp. 7–14.

[6] *V.V. Vaskevich, V.E. Gaishun, D.L. Kovalenko, V.V. Sidski, Ya.A. Kosenok, D.V. Zhyhulin*, "Electrophysical properties of dielectric sol-gel coatings based on silica dioxide", Problems of Physics, Mathematics and Technics, Issue 2(51), 2022, pp. 12–17.

[7] *V.V. Vaskevich, V.E. Gaishun, D.L. Kovalenko, S.A. Khakhomov*, "Dielectric SiO_2 Sol-Gel Coatings for Microelectronics", Springer. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol.939, 2024, pp. 72–80.

[8] *W.C. Ee, K.Y. Cheong*, "Effects of annealing temperature on ultra-low dielectric constant SiO_2 thin films derived from sol-gel spin-on-coating", Physica B: Condensed Matter, Issue 4(403), 2008, pp. 611–615.

[9] T. J. Santner, B. J. Williams, W. I. Notz, "*The Design and Analysis of Computer Experiments. Springer Series in Statistics*". 2003, 285 p.

Evaluation of mechanical properties of C_{60}-fullerene reinforced Ti_3Al under uniaxial tensile deformation: a molecular dynamics study

A. S. Narseev, E. A. Shchepilov, O. G. Komissarenko, U. I. Yankovskaya, P. V. Zakharov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
narseev.as@mail.ru

Abstract. *This study presents a simulation of a Ti_3Al metal-matrix composite reinforced with fullerenes. The simulation was performed using molecular dynamics methods, followed by calculations on the SPbPU supercomputer. Molecular dynamics techniques were employed to model the material's behavior at the atomic level, accounting for interparticle interactions. A hybrid potential was used for a more accurate description of these interactions. A comparison was made between the mechanical properties of the "pure" material and the fullerene-reinforced composite, with additional comparisons involving reinforced materials containing varying numbers of vacancies. Evaluated characteristics included yield strength, ultimate tensile strength, strain, and fracture load. Deformation was applied along the crystal direction corresponding to the [100] Miller index. For reinforcement, a C_{60} fullerene was placed at the center of the simulation cell. The results demonstrated a reduction in mechanical properties in both the reinforced material and the material with increased vacancy concentration. The decrease in ultimate tensile strength in both cases was attributed to several factors. Primarily, the fullerene exhibited favorable behavior under compressive strain but had a detrimental effect under tensile strain due to its dimensional constraints. Vacancies facilitated dislocation formation, leading to accelerated failure of the metallic matrix. The experimental conditions, particularly the periodic boundary constraints imposed on the model, also played a significant role. The findings indicate that both defect structures and reinforcing elements critically influence the mechanical properties of the material*

I. Introduction

Metal-matrix composites based on light metals such as aluminum and titanium show promise for creating strong yet lightweight structural materials [1-6]. However, their brittleness limits practical applications. Reinforcement with carbon nanostructures, particularly fullerenes (C_{60}), enhances mechanical properties due to their high strength and zero-dimensional geometry, which ensures uniform distribution within the matrix [7–9]. The importance of such composites is hard to overestimate for structures requiring enhanced performance under extreme operational conditions. Nevertheless, fundamental questions remain regarding the atomic-scale behavior of these composites, the evolution of their structure under deformation, thermal exposure, and radiation. In this work, we investigate uniaxial tensile deformation in a Ti_3Al-C_{60} composite. Although C_{60} as a reinforcing element tends to play a detrimental role under tensile loading, the key focus lies in the fracture mechanisms of the composite. Since structures incorporating such composites may experience various deformation modes, it is essential to analyze the underlying atomic-scale processes

II. Formulas and Figures

Investigation of mechanical properties of C_{60}-reinforced Ti_3Al composite was conducted using molecular dynamics simulations in LAMMPS [10]. The model was created by cutting a cavity in the Ti_3Al crystal such that placing a C_{60} fullerene at its center minimized the system's energy (Fig. 1). Tensile deformation processes were simulated at a strain rate of 10^{-9} s^{-1} with subsequent visualization in OVITO [11]. To ensure optimal description of interatomic interactions, a hybrid approach was employed utilizing three types of potentials: EAM (Embedded Atom Method), Lennard-Jones, and AIREBO (Adaptive Intermolecular Reactive Empirical Bond Order). This methodology enables accurate characterization of mechanical properties across a wide range of deformations while accounting for available experimental data.

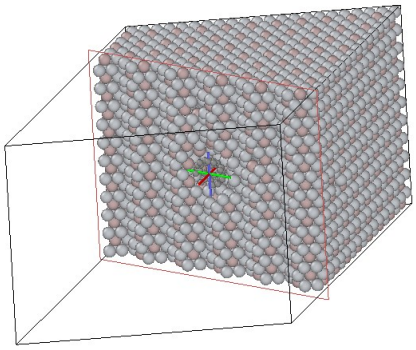


Fig.1. Model Ti_3Al

Analysis of the stress-strain curves obtained from simulations revealed that under tensile loading, the ultimate strength decreases from 19.5 GPa (1% vacancies) to 16.5 GPa (3.5% vacancies). The material exhibits brittle fracture without a yield plateau at higher vacancy concentrations, while demonstrating a distinct yield region at lower vacancy content.

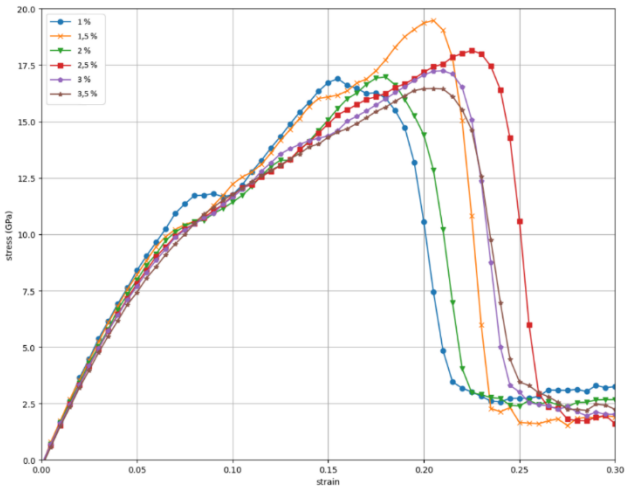


Fig. 2. Stress-strain curves for Ti_3Al with varying vacancy concentrations

The observed effects are associated with vacancy cluster formation at higher concentrations. Consequently, this leads to a less pronounced yield region and greater strain to failure in the composite.

III. Conclusion

The obtained results demonstrate that C_{60} fullerenes under tensile loading reduce the mechanical properties of both the composite material and the Ti_3Al metal matrix. Since we considered a metal matrix containing vacancies - which represents the most realistic scenario for materials subjected to intense external influences - we evaluated strength characteristics for different vacancy concentrations. With increasing vacancy content, the material's strength decreases by 16%. This factor must be taken into account when employing such materials in industrial applications.

References

[1] *Angadi S. B., Nagaral M., Namdev N., Kumar S. M., Ali Z.* A review on constituents, applications and processing methods of metal matrix composites // *International Journal of Science and Research Archive*. 2024. Vol. 11(1). P. 2304-2314.

[2] *Gupta M.* Introduction to Metal Matrix Composite Materials: An Introduction // *Encyclopedia of Materials: Composites.* 2021. Vol. 1. P. 1-10.

[3] *P. Ajay Kumar, V. Vishnu Namboodiri, Gaurang Joshi & Kush P. Mehta* Fabrication and applications of fullerene-based metal nanocomposites: A review // *Journal of Materials Research*. 2021. Vol. 36. P. 114-128.

[4] *Yankovskaya U.I., Starostenkov M.D., Medvedev N.N., Zakharov P.V.* Methods for modeling composites reinforced with carbon nanotubes: review and perspectives // *Computer Research and Modeling*. 2024. Vol. 16. No. 5. P. 1143-1162.

[5] *Yankovskaya U.I., Korznikova E.A., Korpusova S.D., Zakharov P.V.* Mechanical Properties of the Pt-CNT Composite under Uniaxial Deformation: Tension and Compression // *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 4140. https://doi.org/10.3390/ma16114140

[6] *Watanabe H., Sugioka M., Fukusumi M., Ishikawa K., Suzuki M., Shimizu T.* Mechanical and Damping Properties of Fullerene-Dispersed AZ91 Magnesium Alloy Composites Processed by a Powder Metallurgy Route // *Materials Transactions*. 2006. Vol. 47(4). P. 999-1007.

[7] *Perfilov S.A., Evdokimov I.A., Pozdnyakov A.A., Blank V.D.* Nanostructured aluminum-matrix composite material reinforced with fullerenes C60 // *Scientific Proceedings XII International Congress "Machines, Technologies, Materials"*. 2015. Vol. 1. P. 131.

[8] *Khairullin R.R., Evdokimov I.A., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Blank V.D.* Nanostructured aluminum matrix composite materials with duplex structure modified by carbon nanostructures // *Fourth Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation "New Materials and Promising Technologies"*. 2018. No. 3. P. 334-336.

[9] *Ramesh B., Kumar D., Chhabria S., Basavarajappa V., Krishnakumari A., Saravanan M., Sannakki B., Kumaravel D., Hassen A.A.* Investigation on the Properties of Multiwall Carbon Nanotube-, Graphene-, and Fullerene-Reinforced Hot-Extruded AA7075 Matrix Composites // *Journal of Nanomaterials*. 2022. Vol. 2022. Article ID 9419771. P. 11.

[10] *Plimpton S.* Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics // *Journal of Computational Physics*. 1995. Vol. 117(1). P. 1-19.

[11] *Stukowski A.* Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO - the open visualization tool // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2009. Vol. 18(1). P. 015012.

Активная 5×5-элементная метаповерхность с функцией управления фазой для приложений в Ка-диапазоне частот

И. А. Фаняев[1], А. А. Тимошенко[1], А. Л. Самофалов[1],
С. А. Хахомов[1], И. В. Семченко[2]

[1]Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь,
[2]Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск, Республика Беларусь,
samofalov@gsu.by, semchenko@oelt.basnet.by

***Аннотация**. Проведено численное моделирование метаповерхности с функцией управления фазой прошедших электромагнитных волн в Ка-диапазоне. Исследование включало анализ метаповерхности на основе варикапов с размерностью 5×5 элементов. Полученные результаты подтверждают перспективность интегрирования представленной метаповерхности в антенны B5G/6G для динамического управления диаграммой направленности, однако требуют дополнительной оптимизации для практического применения.*

I. Введение

В условиях стремительного развития беспроводных технологий нового поколения, таких как B5G и 6G [1], возрастают требования к антенным системам по параметрам направленности [2], эффективности использования спектра, миниатюризации и гибкости управления характеристиками излучения [3]. Одним из перспективных решений, отвечающих этим требованиям, является интеграция в антенны метаповерхностей – искусственно структурированных материалов, способных управлять электромагнитными волнами с высокой точностью. Особенно важную роль в этом контексте играют метаповерхности [4], обладающие функциями управления фазой [5], амплитудой [6] и поляризацией излучения [7], что позволяет реализовать динамическую адаптацию диаграммы направленности и эффективное формирование луча без механических перемещений.

Данная работа направлена на разработку и численное исследование метаповерхности с функцией управления фазой прошедшей электромагнитной волны в Ка-диапазоне. Подобная метаповерхность предназначена для динамической манипуляции диаграммой направленности (ДН) за счет использования в каждом излучающем элементе активного компонента, такого как варикап, с последующим включением её в состав антенной системы перспективных стандартов связи B5G.

II. Численное исследование метаповерхности

Перестраиваемая метаповерхность основана на использовании активных микрорезонаторов [3] для фазового управления прошедшей волны с размерностью 5×5 элементов. На рис. 1 приведена конструкция микрорезонатора и метаповерхности с линейными размерами dx=50 мм, периодом p=7,2 мм. Предлагаемая конструкция активного микрорезонатора состоит из проводящей площадки и замкнутого прямоугольного контура, в зазоре между которыми подключен варикап (рис. 1, а). Также в конструкции имеется сосредоточенная индуктивность (1 нГн), которая подключена к внешнему контуру и небольшой контактной площадке. Возбуждение колебаний в таком элементе осуществляется за счет энергии электромагнитной волны при её нормальном падении. Предлагаемая структура вследствие использования варикапа позволяет путём изменения напряжения на нем менять электрическую емкость, и как следствие – реактивное сопротивление. Сосредоточенная индуктивность позволяет увеличить общую индуктивность структуры ввиду ее малых линейных размеров. Это дает возможность изменять фазу прошедшей электромагнитной волны в некоторых пределах. Численные значения геометрических параметров микрорезонатора: L=5 мм, w=1,2 мм, g=0,8 мм, s=0,5 мм. Толщина медного слоя t=17 мкм, диэлектрическая подложка Rogers 5880 толщиной h=0,254 мм с диэлектрической проницаемостью 2,2 и тангенсом угла потерь 0,0009.

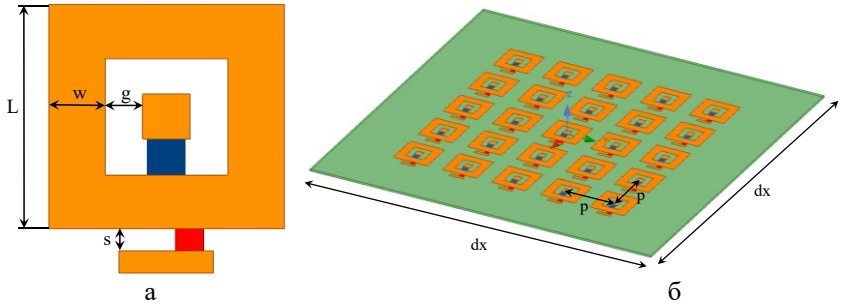
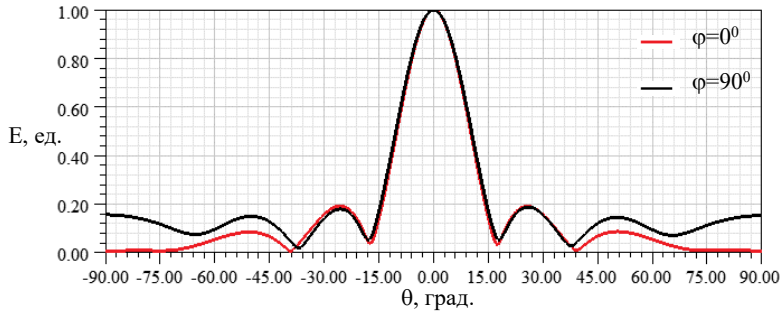


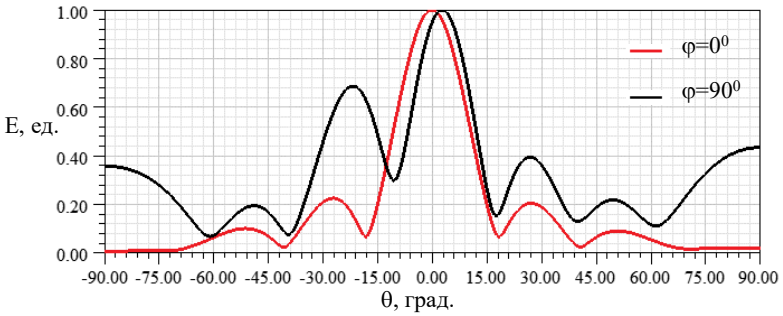
Рис. 1. Конструкция (а) микрорезонатора и (б) метаповерхности с варикапами размерностью 5x5 элементов

Проведено численное моделирование метаповерхности и построены нормированные диаграммы направленности при различных значениях электрической емкости варикапа на каждом микрорезонаторе (рис. 2 и 3).

На рис. 2а представлены нормированные диаграммы направленности в двух главных плоскостях, сформированные метаповерхностью от линейно поляризованной вдоль оси X падающей волны при одинаковой емкости всех варикапов (0,5 пФ). Исследования проводились на центральной частоте 26 ГГц.



а

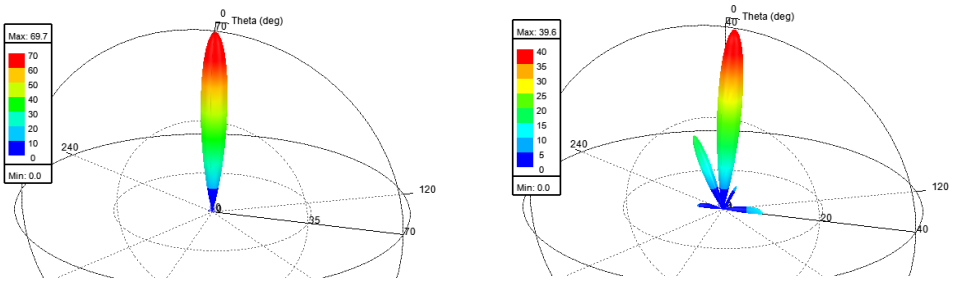


б

Рис. 2. Нормированные диаграммы направленности при различных значениях электроемкости варикапов

На рис. 2б показаны ДН в главных плоскостях, которые сформированы за счет задания разных значений электроемкости варикапов (от 0,15 до 0,5 пФ) в каждом ряду для формирования фазового фронта с отклонением от нормали. Как видно из рис. 2а, сформированный метаповерхностью луч достаточно широкий – порядка 18 градусов. Благодаря изменению электроемкости варикапов удается сформировать фазовый фронт, который отклоняет луч на 4 градуса (рис. 2б).

На рис. 3 приведены ненормированные ДН в сферической системе координат при разных значениях емкости варикапов.



а б

Рис. 3. Ненормированные диаграммы направленности в сферической системе координат (а) без и (б) с наклоном фазового фронта

Анализируя полученные ДН, можно увидеть, что при сформированном активными микрорезонаторами наклоне фазового фронта появляются боковые лепестки и значительно снижается коэффициент направленности.

III. Заключение

В ходе проведённой работы было выполнено численное моделирование конструкции метаповерхности, предназначенной для управления фазой прошедших электромагнитных волн в Ка диапазоне частот. Исследование проводилось для метаповерхности размерностью 5×5 элементов на основе варикапов и сосредоточенных индуктивностей. Установлено, что за счёт изменения емкости варикапов возможно отклонение ДН шириной 18° на угол до 4°, однако такая конфигурация сопровождается выраженными боковыми лепестками, что снижает направленность и эффективность излучения.

В целом, полученные результаты подтверждают высокую перспективность использования активных метаповерхностей для динамического управления фазовым фронтом в антеннах нового поколения. Однако для практической реализации требуется дальнейшая оптимизация конструкции и схемы управления.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ №Ф24КИТГ-005.

Литература

[1] *M. Selvaraj, V. Ramya, A. Rajesh* "Reflective metasurface for 5G & beyond Wireless communications." *Scientific Reports.* V.15(1), 2025, pp. 126.

[2] *A.H. Naqvi, et al.* "1-bit transmission-type digital programmable coding metasurface with multi-functional beam-shaping capability for ka-band applications." *Micromachines,* V.14(6), 2023, pp. 1250.

[3] *A.H. Naqvi Naqvi, L. Sungjoon* "Low-profile electronic beam-scanning metasurface antenna for Ka-band applications." *Waves in Random and Complex Media,* 2023, pp. 1-16.

[4] *Y. Song*, *et al.* "The Design of Chiral Metamaterials and Metasurfaces." Elsevier, 2025. – 268 p.

[5] *S. Verho, C. Jae-Young* "Design of a compact and minimalistic intermediate phase shifting feed network for Ka-band electrical beam steering." *Sensors*, V.24(4), 2024, pp. 1235.

[6] *M.K. Emara, et al.* "Dynamic metasurface reflectors based on coupled resonators for simultaneous magnitude and phase control." *IEEE Access*, V.11, 2023, pp. 129552-129565.

[7] *Y. Ge, L. Chengxiu, L. Yujie* "Broadband folded transmitarray antenna based on an ultrathin transmission polarizer." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, V.66(11), 2018, pp. 5974-5981.

Photoelectric characteristics of the photodiode structure Al/ZnO:MgO/p-Si/Al

V. V. Malyutina-Bronskaya[1], A. V. Semchenko[2],
V. V. Sidski[2], A. S. Kuzmitskaya[1], G. Y. Ayvazyan[3]
[1]SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Belarus,
[2]Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus,
[3]National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia,
malyutina@oelt.basnet.by, alina@gsu.by, agagarm@gmail.com

Abstract. *This paper presents the results of investigations of the photoelectric characteristics of the Al/ZnO:MgO/p-Si/Al photodiode structure. ZnO:MgO films were obtained by the sol-gel method with a ratio of 1:5. Silicon wafers KDB-4.5 were used as substrates, and the thickness of the obtained ZnO:MgO films was about 100 nm. The current-voltage characteristics have been measured and analyzed under the influence of optical radiation of different wavelengths (278 nm, 405 – 1064 nm), the absolute spectral sensitivity at low and high bias voltage was calculated. It is shown that the photosensitivity of the Al/ZnO:MgO/p-Si/Al photodiode structure increases with the rise of the bias voltage from 2.5 V to 20 V in the UV region of the spectrum, reaching 12.2 A/W at a wavelength of 278 nm, and in the visible and IR wavelength ranges it is from 2.5 to 5 A/W.*

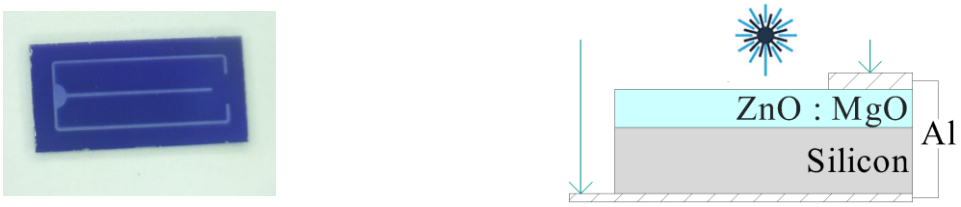
I. Introduction

Zinc oxide (ZnO) is a wide-bandgap semiconductor with unique electrophysical and optical properties, high thermal stability, radiation and chemical resistance. Due to the relatively high optical transmittance, good electrical conductivity and photosensitivity, this material is widely used in solar cells as contact, passivating or transport layers; in light-emitting devices, gas and biological sensors, detectors of ultraviolet, X-ray and gamma radiation [1]. To vary the optical and electrical properties, ZnO is doped with metals from the periodic table of group III, such as B, Al, Mg, Ca, Cd and Ga [2]. It is important that the radius of the doping element is approximately equal to the radius of the replaced element, which ensures the formation of a compound with small distortions of the crystal lattice. In this aspect, the radius of Mg^{2+} ion (0.57 Å) is comparable to that of Zn^{2+} ion (0.60 Å), which makes Mg suitable for substitution in the Zn lattice and facilitating the increase in the band gap [3].

II. Methodology of synthesis and measurements

Layers based on ZnO:MgO films were obtained by the sol-gel method using separate hydrolysis. The following materials were used as starting ones: zinc acetate dihydrate; magnesium acetate; isopropyl alcohol; distilled water; diethanolamine. To prepare the film-forming solution, zinc acetate and magnesium acetate were separately dissolved in isopropyl alcohol and stirred at 60 °C for 10 minutes. Then the sols were mixed in a concentration of 1:5. The film was deposited by centrifugation at a rotation speed of 2000 rpm for 40 s, after which each layer was dried at 60 °C for 10 minutes. After applying each layer, the films were pre-dried in an oven (SNOL) for 5 minutes at a temperature of 250 °C. After applying the second layer, annealing has been carried out at a temperature of 550 °C for an hour. The thickness of the obtained ZnO:MgO films was about 100 nm. Silicon wafers KDB-4.5 were used as substrates.

After applying ZnO:MgO films to the obtained structure by thermal evaporation using a UVN-71P-3 vacuum evaporation unit, metal wiring based on a thin aluminum layer was applied through a metal mask, as shown in Fig. 1a. A continuous aluminum layer was applied to the back side of the silicon. To separate the photodiode structures into individual elements, an EM-2048A wafer mounting unit and an EM-2085V ultra-thin wafer separation unit were used. The dimensions of the manufactured photodiode structures were 10×5 mm^2, their top view and transverse structure are shown in Fig. 1.



a b

Fig.1. Appearance (a) and cross-sectional structure (b) of the Al/ZnO:MgO/p-Si/Al photodiode system

The current-voltage characteristics were measured in the dark and under the influence of optical radiation using tungsten probes, and the probes were connected according to the circuit shown in Fig. 1b. The voltage on the current-voltage characteristics corresponds to the voltage supplied to the upper electrode to the ZnO:MgO film.

The optical module of the measuring complex included a positioning module for placing the test sample and a multispectral laser radiation source consisting of a set of 9 laser diodes with wavelengths of 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 and 1064 nm with a common fiber optic output and with control boards with a radiation power of about 2 mW [4]. A TO-3535BC-UVC265-30-6V-E LED placed in a specialized fixture was used as a source of deep ultraviolet (UV) radiation with a wavelength of 278 nm. All measurements have been performed with a voltage sweep from –20 to +20 V at room temperature.

III. Results and Discussion

Fig. 2a shows the dependence of the current-voltage characteristic of the photodiode structure on the wavelength. It follows from the graphs that the current-voltage characteristic has a practically symmetrical form with clearly expressed photosensitivity. The calculation of the absolute spectral sensitivity was carried out using the formula:

$$S = \frac{I_P - I_D}{P} \quad (1)$$

where IP is the photocurrent, ID is the dark current, P is the power of the radiation source. The results of calculating the absolute spectral sensitivity at low (2.5 V) and high (20 V) voltage are shown in Fig. 2b.

From the analysis of the dependences presented in Fig. 2b, it follows that at a voltage of about 2.5 V, the Al/ZnO:MgO/p-Si/Al structure has photosensitivity in the visible and IR spectral regions, and if in visible radiation the photosensitivity is in the range from 0.01 A/W to 0.02 A/W, then upon reaching the IR spectral region with an increase in wavelength, a sharp increase in photoconductivity occurs from 0.02 A/W at 808 nm to 0.14 A/W at 1064 nm. A negative photoelectric effect is observed in the UV region.

The lack of sensitivity to UV radiation at low voltage and a sharp increase in photoconductivity with increasing wavelength in the IR region of the spectrum corresponds to p-Si, which indicates that in this photodiode structure, selectivity to UV radiation is not observed due to the small thickness of the ZnO:MgO film.

а б

Fig.2. Dependences of the current-voltage characteristics (a) and absolute spectral sensitivity (b) of the photodiode structure Al/ZnO:MgO/p-Si/Al on the wavelength

When the voltage increases to 20 V, the photosensitivity is most pronounced in the UV region of the spectrum, reaching 12.2 A/W at a wavelength of 278 nm and decreasing as it approaches the visible range to 5 A/W at a wavelength of 405 nm. In the visible region of the spectrum, the photosensitivity is in the range from 2.5 to 3.5 A/W. Upon reaching the near IR region, photosensitivity begins to increase with increasing wavelength from 2.7 A/W for 808 nm to 4.3 A/W for 1064 nm.

The appearance of photosensitivity in the UV region of the spectrum at high voltage applied to the electrode on the ZnO:MgO film is caused by the photogeneration of minority charge carriers during the bending of the p-n junction zones.

III. Conclusion

Experimental samples of the Al/ZnO:MgO/p-Si/Al photodiode structure were synthesized and their photoelectric characteristics have been measured. It was shown that at a voltage of about 2.5 V, photosensitivity of the visible and IR spectral regions is observed, and in the IR region, as the wavelength increases, a sharp increase in photoconductivity occurs. A negative photoeffect is observed in the UV region. This indicates the absence of selectivity to UV radiation due to the small thickness of the ZnO:MgO film.

When the voltage is increased to 20 V, due to the photogeneration of minority charge carriers during the bending of the p-n junction zones, high photosensitivity of the Al/ZnO:MgO/p-Si/Al photodiode structure to deep UV radiation appears.

References

[1] *G.Y. Ayvazyan et al.,* "Synthesis, investigation and neural network modeling of the properties of sol–gel ITO/ZnO and ITO/ZnO:Mg structures"*, News of the National Academy of Sciences of Armenia. Physics A***58**(3), 2023, pp. 366-375.

[2] V. Sabayev *et al.,* "Induced surface reactivity modification in Zinc oxide-based thin films", *Appl. Phys. Lett*. A**93**(144), 2008, pp. 104.

[3] *S.J. Priscilla et al*., "Effect of magnesium dopant on the structural, morphological and electrical properties of ZnO nanoparticles by sol-gel method", *Materials Today:Proceedings*. A**36,** 2021, pp. 793-796.

[4] V.V. Sidsky *et al*. "Photoactive and Structure Properties of ZnO:XMgO Nanocomposite Sol–gel Films on the Surface of Silicon" *Research and Education: Traditions and Innovations Proceedings of the 19th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2021)*, 2022, pp. 227.

Нейро-нечеткое моделирование лазерного легирования стали 30ХГСН2А

Ю. В. Никитюк[1], А. Г. Баевич[1], А. В. Максименко[1],
В. В. Ким[2], Ш. Р. Камалов[2], И. Ю. Аушев[3]
[1]Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь,
[2]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан,
[3]Университет гражданской защиты, г. Минск, Беларусь,
nikitjuk@gsu.by

***Аннотация**. В работе выполнено нейро-нечеткое моделирование лазерного легирования хромом конструкционной стали 30ХГСН2А. Конечно-элементное моделирование лазерного легирования стали было выполнено с учетом зависимости теплофизических свойств материалов от температуры в программе ANSYS. Была сформирована нейро-нечеткая модель лазерного легирования стали 30ХГСН2А с использованием гранецентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента. В качестве факторов эксперимента использовались временные интервалы, соответствующие длительностям трех фронтов лазерного импульса, и пиковые плотности мощности этих фронтов. В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки. Проведена проверка модели на тестовом наборе данных.*

I. Введение

В настоящее время используются различные технологии, обеспечивающие формирование заданных свойств поверхности изделий при сохранении свойств основного материала. Одними из наиболее перспективных технологий являются технологии лазерной обработки, к ключевым достоинствам которых относятся возможность создания покрытий из различных материалов и возможность обработки изделий практически любых размеров и геометрии. Среди технологий лазерной обработки широкое распространение получило лазерное легирование, являющееся эффективным методом улучшения поверхностных свойств металлов. Лазерное легирование позволяет изменять состав и структуру поверхностного слоя изделия с помощью высокоэнергетического лазерного воздействия, обеспечивая высокую точность обработки и улучшение эксплуатационных характеристик материала [1-2].

Искусственные нейронные сети характеризуются эффективностью моделирования сложных взаимосвязей между входами и выходами системы и успешно применяются для моделирования процессов лазерной обработки материалов [3-5]. Средствами теории нечетких множеств можно отразить произвольную взаимосвязь «вход - выход» без использования сложного математического аппарата, при этом нечеткое моделирование также применяется для исследования процессов лазерной обработки. Нейросетевые модели, как правило, требовательны к качеству и объему обучающей выборки. К недостаткам нечетких моделей можно отнести зависимость от экспертного знания при формировании нечетких правил. Эти недостатки можно устранить за счет интеграции искусственных нейронных сетей в систему нечеткого вывода. Данный подход позволяет обучать такие системы без привлечения экспертов, а гибридные сети обеспечивают возможность сочетания преимущества двух подходов, что позволяет преодолевать основные ограничения каждого из них [6].

Система ANFIS является примером эффективной реализации нейро-нечеткого подхода. В данной работе с использованием нейро-нечетких сетей ANFIS выполнено моделирование лазерного легирования хромом конструкционной стали 30ХГСН2А.

II. Определение параметров лазерного легирования

Расчет температур был выполнен с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS. Расчетная модель представляла собой пластину из стали 30ХГСН2А размерами 3x3x1 мм, на поверхность которой был нанесен слой обмазки толщиной 100 мкм, содержащий легирующий компонент. При этом обеспечивалось образование равномерно оплавленного слоя. Схема воздействия лазерного излучения на обрабатываемую поверхность представлена на рисунке 1.

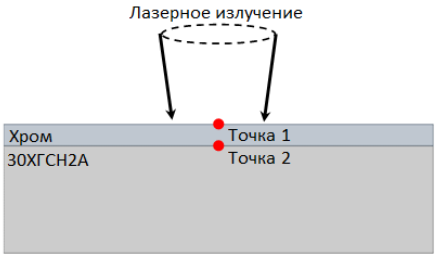


Рис. 1. Схема воздействия лазерного излучения

При численном эксперименте был использован шестифакторный гранецентрированный вариант центрального композиционного плана. В качестве факторов эксперимента использовались временные интервалы t1, t2, t3, соответствующие длительностям трех фронтов лазерного импульса, и пиковые плотности мощности этих фронтов p1, p2, p3 (рисунок 2).

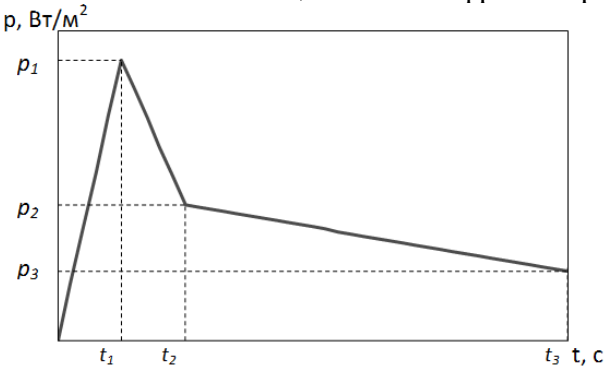


Рис. 2. Форма импульса лазерного излучения

В качестве откликов использовались температуры в зоне обработки: T1, T2 и T3 – температуры на поверхности нанесенного слоя обмазки, содержащей легирующий компонент в моменты времени, соответствующие завершениям первого, второго и третьего фронтов лазерного импульса соответственно; T4 – температура на глубине 100 мкм в момент времени, соответствующий завершению третьего фронта лазерного импульса.

Обучение нейро-нечеткой системы ANFIS проводилось на наборе данных, полученных в результате численного эксперимента в течение 20 эпох. Пример диаграммы, показывающей зависимость максимальной температуры T1 от параметров обработки, полученных с использованием системы ANFIS, представлен на рисунке 3.

Тестовая выборка была сформирована при решении соответствующих задач методом конечных элементов в программе ANSYS. Для оценки полученных нейро-нечетких моделей были использованы следующие критерии: коэффициент детерминации R^2, средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE), средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE).

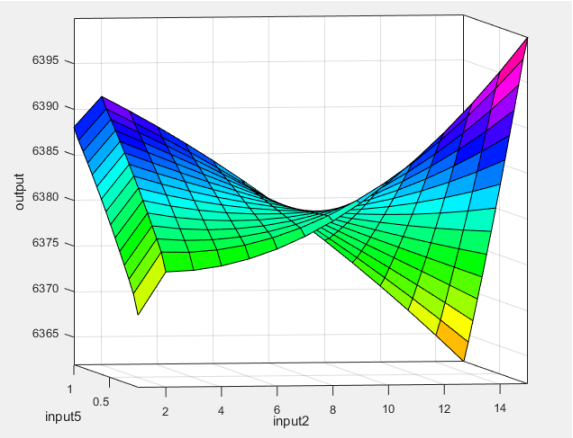


Рис. 3. Зависимость T1(K) от параметров обработки
input2 = t1 (мс) и input5 = p2 (Вт/м^2 •10^9)

В таблице 1 представлены результаты оценки соответствующих нейро-нечетких моделей.

Таблица 1. Результаты оценки моделей

	T1	T2	T3	T4
RMSE	411 K	169 K	250 K	149 K
MAE	355 K	150 K	218 K	133 K
MAPE	6.7 %	5.3 %	5.0 %	6.4 %
R^2	0.9802	0.9808	0.9747	0.9795

Полученные данные показывают наличие необходимого соответствия нейро-нечеткой модели результатам конечно-элементного анализа, что позволяет сделать вывод о том, что при прогнозировании параметров лазерного легирования возможно использование нейро-нечетких моделей.

III. Заключение

В результате выполненных исследований показана возможность определения режимов лазерного легирования конструкционных сталей на основе сочетания метода конечных элементов и нейро-нечетких моделей.

Литература

[1] *А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров*. Технологические процессы лазерной обработки. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006, 664с.

[2] *О. Г. Девойно [и др.].* Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки. Минск : БНТУ, 2020, 280с.

[3] *Prashant P Kharche and Vijay H Patil,* "Systematic review of optimization techniques for laser beam machining." Engineering Research Express, Vol 6, № 2, 2024.

[4] *Y. Nikitjuk, G. Bayevich, V. Myshkovets, A. Maximenko, I. Aushev*, “Characterization of Laser Welding of Steel 30ХГСН2А by Combining Artificial Neural Networks and Finite Element Method” In: *Research and Education: Traditions and Innovations. INTER-ACADEMIA* 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 422. Springer, Singapore, 2022, pp.273-279.

[5] *Г. А. Баевич, Ю. В. Никитюк, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, И. Ю. Аушев*, “Оптимизация обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми лазерными пучками”, *НАУКА и ТЕХНИКА*, 22(3), 2023, с. 186-192.

[6*] С.Д. Штовба*. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва, Горячая линия, 2007, 284с.

Обеспечение стабильности технологических процессов изготовления деталей приборов

С. А. Братчиков, Ю. С. Андреев
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия,
loross90@gmail.com

Аннотация. *Исследованы количественные характеристики, определяющие надежность технологических процессов, в частности стабильность. Рассмотрены существующие методы оценки стабильности. Определены основные параметры технологических процессов резания при изготовлении деталей приборов, оказывающие значимое влияние на стабильность и доступные к измерению. Определены перспективные способы оценки стабильности с применением технологий машинного обучения и специфичные параметры модели. Определены дальнейшие научные задачи.*

I. Введение

Качество готовой продукции, полученной в результате механической обработки, определяется в том числе стабильностью технологического процесса. [1] Снижение стабильности технологической системы способно привести к повышению процента брака, снижению производительности и увеличению производственных затрат. Поэтому вопросы связанные с обеспечением надежности и, в частности, стабильности как фактора надежности являются актуальными и перспективными. [2] В соответствии со стандартами, контроль стабильности процессов и принятие упредительных мер по ее обеспечению является обязательным, как в процессе производства, так и на этапе технологической подготовки производства.

Существующие методы оценки стабильности технологических процессов основаны на составлении карт Шухарта. Описанный метод оперирует историческими данными, а значит, оценить надежность системы и стабильности, в частности, на будущих временных интервалах не представляется возможным. Формирование карт требует сбора значительного объема данных, последующей обработки и определения факта стабильности процесса уже выполненного процесса. Однако, в условиях единичного или мелкосерийного производства, а также в условиях приборостроительного производства, зачастую содержащего единичные технологические процессы, сбор достаточного объема данных для оценки стабильности затруднителен. Кроме того, обработка информации и вывод о стабильности процесса в таких условиях может оказаться несвоевременным и неактуальным, поскольку в соответствии с нуждами производства технологический процесс изменился. В связи с описанным, актуальна задача поиска методов, снижающих трудоемкость и длительность оценки стабильности технологической системы, а также позволяющих ее прогнозировать.

II. Описание методов исследования

Современные подходы к оценке стабильности технологических процессов основаны на контроле, сборе, и анализе параметров, характеризующих техническое состояние оборудования; параметров, характеризующих внешние факторы по отношению к ТС; параметров характеризующих качество изделий. Важнейшими из них являются сила и глубина резания [3], вибрации и температурные режимы режущего инструмента, вибрации оборудования, параметры шероховатости поверхности обрабатываемой детали, геометрическая точность изделий согласно и степень износа рабочих поверхностей инструмента. Кроме того, контролируют и анализируют [4] параметры потребления энергии, расчетное и фактическое положение инструмента. Сбор этих данных на практике возможен за счет применения современной контрольно-измерительной аппаратуры, например тензометров [5], инфракрасной термографии, систем вибродиагностики.

Последующее применение систем автоматизированной сборки и обработки информации позволяет производить оценку стабильности процесса по контролируемым параметрам, определять корреляции, в том числе с учетом исторических данных, между характером изменения

значений параметров и характером изменения значений параметров качества изделий, что в свою очередь ведет к возможности прогнозировать стабильность во времени параметров продукции, поскольку стабильность — это основная статистическая характеристика параметра.

Для автоматизации определения корреляции между стабильностью, ускорения этого процесса, учета возможных неявных зависимостей, которые могут быть не учтены в аналитических моделях, целесообразно применять методы машинного обучения [6] для целей прогнозирования стабильности технологических процессов механической обработки. В то же время встает вопрос о выборе наиболее эффективного и целесообразного метода для решения задачи прогнозирования, среди которых выделяются регрессионные модели (в частности ARIMA), нейронные сети (MLP, CNN, LSTM), алгоритмы на основе метода опорных векторов (SVM), случайный лес (Random Forest), бустинг (XGBoost, CatBoost, LightGBM). [7] Разнообразие и особенности существующих методов определяют одну из научных задач обоснованного выбора алгоритма для прогнозирования стабильности с учетом специфики анализируемых данных.

Повышение точности прогноза может быть также достигнуто за счет выбора подходящего под специфику временного ряда процедуры обучения [8]. Существуют несколько распространенных: отбор лучших признаков (feature selection), перекрестная проверка (cross-validation), гиперпараметрическая оптимизаця (GridSearch или Bayesian optimization) и ансамблирование нескольких моделей. Оптимальное применение указанных методов приводит к повышению скорости обучения, снижению ресурсов на формирование модели, а также повышению точности. Таким образом, выбор эффективного метода обучения модели является важной задачей.

III. Заключение

Развитие методов оценки и прогнозирования стабильности как характеристики надежности технологической системы есть многопараметрическая задача. Необходимо совмещать принципы математического моделирования, машинного обучения, математической статистики для обеспечения и последовательного повышения надежности и эффективности технологических систем.

Литература

[1] *Abellan-Nebot, J.V., Subirón, F.R.,* "A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models" // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010.

[2] *Андреев Ю.С., Басова Т.В.* Разработка метода технического диагностирования режущего инструмента на этапах технологической подготовки производства // *Приборы* - 2024. - № 1(283). - С. 17-25.

[3] *Vnukov Y. et al.* Possibilities of using stability lobe diagram for stability prediction of high speed milling of thinwalled details. – 2017.

[4] *S. Shurrab, A. Almshnanah and R. Duwairi*, "Tool Wear Prediction in Computer Numerical Control Milling Operations via Machine Learning".

[5] *Choudhury S., Srinivas M.S.,* "Tool wear prediction in turning" // *Journal of Materials Processing Technology*, 2004.

[6] *Волков, И.А.* Application of Machine Learning Methods for Production Data Analysis / *И.А. Волков, Ю.С. Андреев* // *2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon*). - 2025. - № - Access mode: *https://ieeexplore.ieee.org/document/10986.*

[7] *Cheng C. et al.* Time series forecasting for nonlinear and non-stationary processes: a review and comparative study //*Iie Transactions*. – 2015. – Т. 47. – №. 10. – С. 1053-1071.

Оценка пористости покрытий деталей после газопламенного напыления методом статистической сегментации изображений

Ю. С. Яковлев, Ю. В. Бруттан
Псковский государственный университет, г. Псков, Россия,
yu.vorkuta@yandex.ru, bruttan@pskgu.ru

***Аннотация**. В работе представлен алгоритм автоматического определения пористости газопламенных покрытий по микрофотографиям деталей высокого разрешения (≈4246×4312 пикселей). Метод опирается на выделение рабочей кольцевой области образца, её секторизацию (разделение на 12 секторов) и локальную статистическую нормализацию яркости в каждом секторе. Для выявления пор строится Z-карта, по которой формируются точки аномально тёмных или светлых зон; далее выполняется расширение областей с контролем порога и максимального размера, после чего применяется морфологическое замыкание и селективная заливка небольших внутренних просветов. В результате вычисляются общая и секторальная пористость, а также на исходное изображение накладывается контур пор с подписью процентных значений. Подход устойчив к неравномерному освещению и контрасту, настраивается и пригоден для покрытий с градиентными и комбинированными свойствами. Подход согласуется с современными трендами анализа дефектов на изображениях и дополняет ML-методы, которые активно развиваются для оценки пористости и поверхностных дефектов в материаловедении.*

I. Введение

Пористость заметно влияет на свойства покрытий: поры служат концентраторами напряжений, повышают проницаемость для коррозионных сред, влияют на износостойкость и коэффициент трения. Для газопламенных металлических покрытий образование пор связано с неполным спеканием частиц и захватом газов. Поэтому необходим быстрый и воспроизводимый контроль по изображениям микроструктуры. В последние годы автоматизированный анализ изображений активно применяется для оценки пористости и родственных дефектов, а также сочетается с методами глубокого обучения для дефектоскопии поверхностей [1–3, 6–8].

II. Метод определения пористости на изображении

На полированной поверхности поры проявляются как темные (низкой интенсивности) и наоборот слишком светлые связные области в материале покрытия. Эти области трактуются как пустоты и подлежат количественной оценке по площади.

Из цветного кадра выбирается серый канал с лучшим контрастом. Окружность делится на 12 равных по углу секторов для карты неоднородности. Полнорадиальные маски секторов используются для устойчивой оценки статистик фона. Для каждого сектора s считаются μ_s и σ_s; для каждого пикселя в рабочей области вычисляется по формуле (1):

$$Z = \frac{\sigma_s}{(I - \mu_s)} \quad (1)$$

Пиксели с $|Z| > Z_{seed}$ маркируются как аномалии. Такой Z-подход компенсирует неравномерность освещения и локальные вариации тона, работая устойчивее, чем один глобальный порог [2, 4].

После этого из аномалий выполняется расширение (8-связность) до порога $|Z| > Z_{\text{grow}}$, вводится ограничение максимальной площади связной области во избежание захвата фоновых неоднородностей. Далее применяется замыкание и селективная заливка небольших образовавшихся пробелов в результате роста. В итоге получается бинарная маска пор. Подобные гибридные приемы остаются эффективными для пор/трещин в современных задачах, в т.ч. как часть ML-конвейеров [4-5].

Соответственно получаем набор параметров: количество секторов, Z_{seed}, Z_{grow}, максимальный регион, окно замыкания, максимальный размер заливки. Эти параметры

экспонируются для адаптации под набор изображений в соответствии с материалом/контрастом изображений.

Основные формулы:

- Оценка дисперсии в секторе s:

$$\sigma_s^2 = \mathrm{E}[\mathrm{I}^2] - \mathrm{E}[\mathrm{I}]^2 \quad (2)$$

- Общая пористость:

$$P = \frac{\left|M_{\mathrm{pore}}\right|}{\left|M_{\mathrm{ring}}\right|} \cdot 100\% \quad (3)$$

- Пористость по секторам:

$$P_i = \frac{\left|M_{\mathrm{pore}} \cap \mathrm{sector}_i\right|}{\left|\mathrm{sector}_i\right|} \cdot 100\% \quad (4)$$

III. Результаты

Разработанный алгоритм корректно выделяет поры разных размеров. Итоговое изображение содержит границы секторов и подписи процентов пористости. Результат работы алгоритма обнаружения пор представлен на Рис. 1.

Рис.1. Результат обработки изображения

Общий процент пористости в выделенном кольце составил 39.93%

IV. Заключение

Предложенный подход дает стабильную сегментацию на сложном фоне и может служить валидатором для DL-моделей. Классические сегментаторы эффективно работают для определения локальных дефектов (поры, трещины), а DL-архитектуры улучшают обобщаемость при наличии разметки [1, 3, 5, 7]. Для покрытий газопламенного напыления актуальна 2D-оценка пористости по изображениям.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации программы развития Псковского государственного университета программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

Литература

[1] *Ameri R., et al.* A systematic review of deep learning approaches for surface defect detection in industrial applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 2024.

[2] *Tejero-Martin D., et al.* Evolution of porosity in suspension thermal sprayed YSZ coatings: image analysis by SEM. *Surface & Coatings Technology,* 2021.

[3] *Li B., et al.* Study on Porosity of Thermal-Sprayed Commercially Pure Molybdenum Coatings by Digital Image Analysis. *Materials,* 2023.

[4] *Khan Z. A., et al.* Enhancing pore network extraction performance via seed-based pore region growing segmentation. *Medical Engineering & Physics,* 2024.

[5] *Lema D. G., et al.* Benchmarking deep learning models for surface defect detection. *Journal of Intelligent Manufacturing,* 2025.

[6] *Chawla K., et al.* Benchmarking image processing techniques for porosity quantification on microscopy images. *Composites Part A,* 2025.

[7] *Le T. V., et al.* Surface defect detection using distributed features (DF-SDD). *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 2025.

[8] *Wilbig J., et al.* Comparison of Porosity Analysis Based on X-Ray Computed Tomography: Segmentation and Uncertainty. *Applied Sciences,* 2025.

Испытания спроектированного импульсно-вихретокового устройства для контроля коррозии ферромагнитных труб

А. К. Шепелев, А. М. Добренко, В. П. Лунин
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
ShepelevAK@mpei.ru, DobrenkoAM@mpei.ru, LuninVP@mpei.ru

Аннотация.*В работе описаны лабораторные испытания созданного импульсно-вихретокового устройства, предназначенного для обнаружения и оценки коррозионных повреждений в ферромагнитных трубах без необходимости удаления изоляционного покрытия. На основе разработанной и протестированной конечно-элементной модели был спроектирован импульсно-вихретоковый преобразователь [1]. Предложена методика диагностирования сплошной коррозии, основанная на анализе временных характеристик затухающего вихретокового сигнала. Экспериментальные испытания проводились на специальном тестовом образце с варьируемой толщиной стенки, имитирующей равномерную коррозию от 2 до 10 мм. Результаты подтвердилидостаточно высокую чувствительность сигналов преобразователя к изменениям толщины контролируемого объекта. На основании полученных данных построена калибровочная характеристика, позволяющая количественно оценивать степень коррозионного износа. Дополнительно изучена реакция преобразователя на локальные коррозионные дефекты (питтинги), продемонстрировавшая вполне определенные зависимости амплитудно-временных параметров выходного сигнала от глубины и поперечной площади коррозионного поражения.*

I. Введение

Современные трубопроводные системы играют ключевую роль в транспортировке нефти, газа и других ресурсов, однако их эксплуатация сопряжена с рисками, главным из которых является коррозия. Разрушение металла под воздействием внешних факторов может привести к авариям, экологическим катастрофам и значительным экономическим потерям. Именно поэтому контроль состояния трубопроводов — от этапа производства до вывода из эксплуатации — остается одной из важнейших задач промышленности. Для минимизации аварий на трубопроводах и других критически важных объектах широко применяются неразрушающие методы контроля (НК) – технологии, позволяющие оценивать состояние материалов и конструкций без их демонтажа или повреждения [2].

Одним из популярных методов неразрушающего контроля является импульсно-вихретоковый метод (Pulsed Eddy Current, PEC), широко применяемый в различных отраслях промышленности. В последние годы его активно используют для диагностики ферромагнитных труб. В отличие от традиционного вихретокового контроля, PEC основан на том же физическом принципе, но использует кратковременные импульсы тока для генерации магнитного поля. Такой подход обеспечивает повышенную чувствительность и лучшее разрешение при обнаружении дефектов, включая коррозию и утонения стенок.

Цель исследования - изучить эффективность импульсно-вихретокового метода (PEC) для выявления коррозионных повреждений трубопроводов с применением преобразователя, разработанного методом конечно-элементного моделирования.

II.Описание лабораторной установки

Опыты проводились на установке, включающей генератор импульсов с двумя индикаторами (для визуализации параметров формы/скважности импульсов и отображения максимальной амплитуды напряжения), возбуждающую и приёмную катушки (рис. 1). Преобразователь выполнен по плоской концентрической схеме с возбуждающей катушкой большего диаметра по сравнению с приёмной.

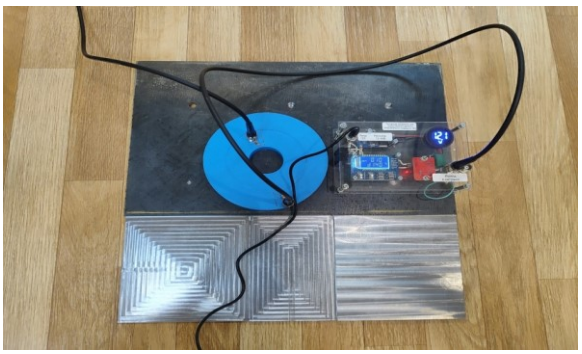


Рис.1. Преобразователь, электронный блок
для генерации импульса и регистрации приемного сигнала,
контрольный образец ферромагнитной пластины

В качестве объекта контроля использовался образец из магнитной стали с четырьмя градациями толщины (100, 80, 50 и 20% номинальной толщины), имитирующими участки сплошной коррозии, и четырьмя искусственными дефектами (сверлениями диаметром 10 мм) питтингового типа с локальным уменьшением толщины 100, 80, 50 и 20 % от номинальной толщины образца (рис. 1).

III. Методика экспериментальных испытаний

Измерения выполнялись методом последовательного позиционирования преобразователя на контрольных участках с варьируемой толщиной в диапазоне 10-2 мм. Для каждого значения толщины (в порядке убывания от максимального значения 10 мм) фиксировался выходной сигнал в логарифмическом представлении. Весь цикл измерений (10, 8, 5, 2 мм) повторялся 6 раз для обеспечения статистической достоверности результатов. На рисунке 2 выведены 6 измерений одной толщины.

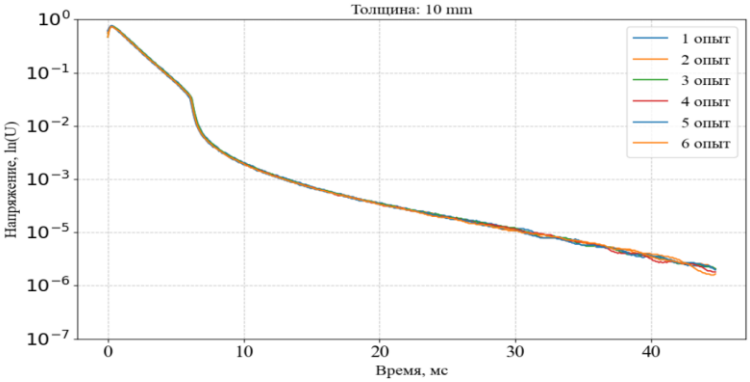


Рис. 2. Временные зависимости натурального логарифма напряжения приемной катушки
для толщины 10 мм (по 6-ти опытам)

Полученные сигналы для каждой толщины усреднялись, что позволило получить итоговые временные зависимости сигнала (рис. 3).

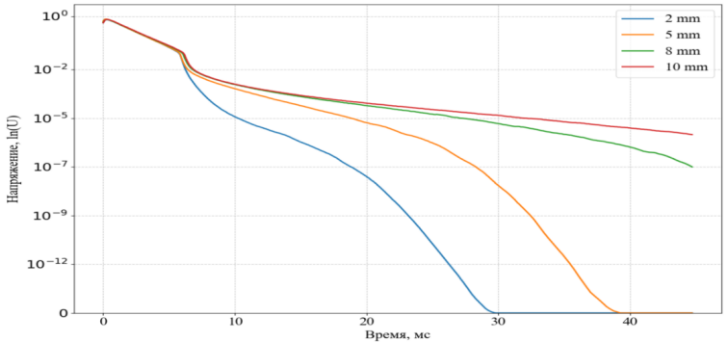


Рис.3. Временные зависимости натурального логарифма напряжения приемной катушки
для различных толщин контролируемого объекта

Для усредненных кривых в диапазоне 10-20 мс определялся градиент логарифмического сигнала. На основе рассчитанных градиентов для всех толщин была получена итоговая калибровочная характеристика преобразователя (рис. 4).

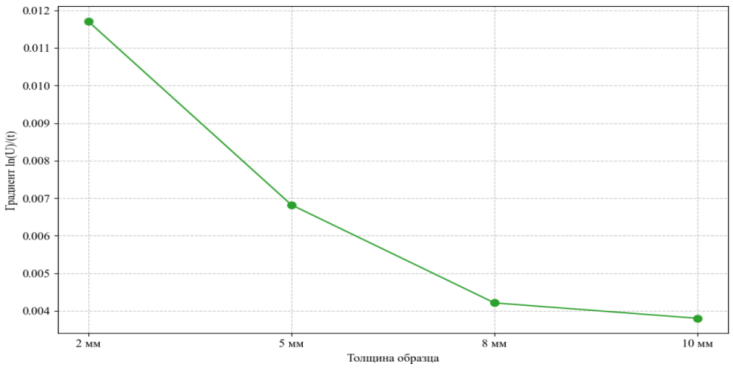


Рис.4. Итоговая калибровочная характеристика
для определения остаточной толщины пластины

IV.Заключение

Проведенные испытания созданного устройства с преобразователем, предварительно спроектированным методом конечных элементов, подтвердили его достаточно высокую чувствительность к изменениям толщины объекта контроля, что согласуется с результатами численного моделирования.

Литература

[1] *Лунин, В.П.* Проектирование ИВТ преобразователя для контроля коррозии ферромагнитных труб с изоляцией / *В.П.Лунин, А.К.Шепелев* // *Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 9-й Междунар. науч.-техн. конф*., Могилев, 26–27 сентября 2024 года – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – с. 119–124

[2] Официальный сайт «Инжиниринг» - Вихретоковый метод неразрушающего контроля [Электронный ресурс] *https://a3-eng.com/stati/vixretokovyij-metod-kontrolya.html*

Секция 5

Системы управления и автоматизации

Control and automation systems

Распространение сейсмических волн и исследование плазменно-импульсного воздействия на горные породы

А. Ф. Пащенко
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
a.paschenko@ipu.ru

***Аннотация**. В статье рассматривается проблема распространения упругих сейсмических волн, вызванных плазменно-импульсной обработкой нефтяных и газовых скважин. Изложен теоретический подход. Приведены результаты экспериментального микросейсмического мониторинга. Показано, что низкочастотные волны от ПИВ могут распространяться на расстояние до нескольких километров от источника колебаний.*

I. Введение

Физической основой плазменно-импульсного воздействия (ПИВ) являются периодические импульсы одинаковой силы, разнесенные через равные промежутки времени, вызванные прохождением разрядного тока через калиброванный металлический проводник (проволоку), который после взрыва преобразуется в пар с высокой плотностью, температурой и давлением. Образованная взрывом ударная волна, распространяясь радиально со сверхзвуковой скоростью, выходит через перфорационные отверстия и создает сжимающее и растягивающее упругое воздействие на окружающую среду.

В настоящее время технология ПИВ широко применяется во многих странах для интенсификации добычи нефти на месторождениях различных нефтяных компаний. С 2015 года технология предлагается также для угольных метановых месторождений с целью ускорения дегазации угольных пластов и промышленной разработки запасов метана, содержащихся в угле. В настоящей работе рассматриваются вопросы распространения сгенерированных сейсмических волн и их влияние на продуктивные залежи углеводородного сырья.

II. Формулы и рисунки

В ранее опубликованных работах, в частности [1], указывалось, что внутри продуктивных залежей постоянно действуют собственные незатухающие свободные колебания, придающие им нестационарность, контролируемую стационарной круговой (угловой) частотой, которую обычно называют доминирующей частотой, специфичной для каждого пласта и резервуара. Соответственно, в основу разработки технологии ПИВ была положена идеология, согласно которой колебания, генерируемые в резервуаре, должны максимально соответствовать частоте собственных колебаний скелета горной породы и насыщающих ее флюидов. При этом из ряда работ известно, что доминирующие частоты Земли принадлежат низкочастотному диапазону от 5 до 20 Гц [2], то есть эти колебания относятся к классу сейсмических волн. Теоретические исследования и физико-математическое моделирование позволили предположить, что генерируемые ПИВ низкочастотные (сейсмические) волны могут распространяться на значительные расстояния, а значит, оказывать воздействие на часть пласта, достаточно удаленную от обрабатываемой скважины. В частности, разработана физико-математическая модель насыщенной пористой среды. В качестве опорной принята квазистационарная модель Био [3], самосогласованно описывающая фильтрацию флюидов, насыщающих пласт, и напряженно-деформированное состояние вмещающих пород, вызванное полем порового давления. Общая структура разработанной модели представлена на Рисунке 1.

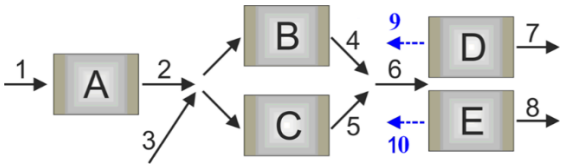


Рис. 1. Блок-схема модели

Здесь, компоненты общей модели:

A – Модель электрического взрыва проводника (проволоки) в слабосжимаемой среде.

B – Квазистационарная модель «пьезопроводности» Био.

C – Нестационарная «колебательная» модель Био.

D – Кинетическая модель выделения газа в пласте при воздействии ПИВ.

E – Модели рассеянной трещиноватости в пласте при воздействии ПИВ.

Стрелками указаны входные и выходные параметры для каждого блока модели.

III. Эксперименты по микросейсмическому мониторингу

Для подтверждения заявленных возможностей технологии ПИВ и получения инструмента для совершенствования методов обработки скважин и пластов были проведены пилотные работы по пассивному микросейсмическому мониторингу на площади 40 000 м² в двух из 4 дегазационных скважин, пробуренных в метаноносном пласте на участке Ерунаковский Восточный Кузбасского угольного бассейна. Выбор метода пассивного микросейсмического мониторинга для исследования процесса и результатов ПИВ был связан с тем, что он не требует мощных источников зондирующих сигналов и использует постоянно существующие слабые сейсмические поля искусственного или естественного происхождения. Схема эксперимента приведена на Рисунке 2.

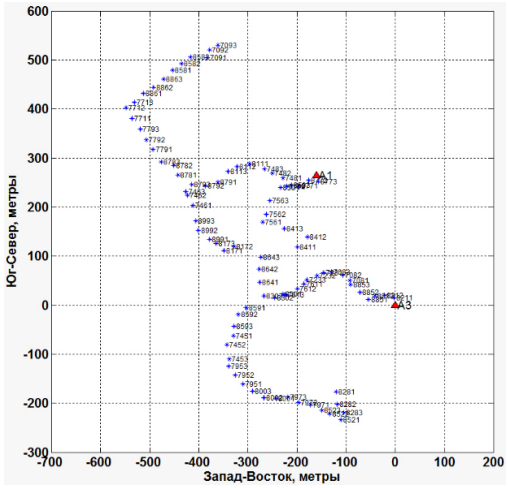


Рис. 2. Схема систем мониторинга вокруг скважин А-1 и А-3. Ось X указывает расстояние в метрах в направлении с запада на восток; ось Y указывает расстояние в метрах в направлении с юга на север

Таким образом, целью исследований было определение зон микросейсмической активности при проведении ПИВ в разное время в четырех скважинах, расположенных на расстоянии 200 и 400 метров друг от друга соответственно.

За период наблюдений с 23 марта по 04 мая 2015 года получено более 232 ГБ данных. Все данные были обработаны с использованием Технологии обратных задач [4]. В результате получена карта распределения источников микросейсмической эмиссии, с учетом значения достоверности выделенных источников сейсмических событий и определены их основные параметры: координаты в пространстве, время события, частотные характеристики, средняя скорость распространения сейсмических волн от сейсмического источника до антенны.

В результате интерпретации составлены карты зарегистрированных микросейсмических событий и плотности энергии микросейсмической эмиссии в проекциях на поверхность. Наибольшая плотность энергии микросейсмических событий наблюдается под сейсмической антенной вблизи забоя скважины А-1. Область микросейсмической активности имеет эллиптическую форму с преимущественным направлением распространения на юго-запад по азимуту 225 градусов. Примерные линейные размеры области микросейсмической активности составляют 1500 метров с севера на юг и 1250 метров в направлении с запада на восток.

Согласно анализу, в период наблюдения процесс сокращения объема преобладал над процессом увеличения объема, а процесс закрытия трещин соответственно преобладал над процессом их раскрытия. Другими словами, более легкая фаза (газ) переходила в свободное состояние из пор, трещин и капилляров, вызывая уменьшение объема, с одновременным раскрытием закрытых пор и трещин и развитием микротрещин в твердых породах (угле).

В целом можно с достаточной уверенностью утверждать, что наблюдение за кинематическими и динамическими характеристиками области микросейсмической активности в районе установки системы наблюдения свидетельствует об увеличении проницаемости пластов на значительном расстоянии на площади, составляющей более 1 кв. км.

IV. Заключение

Сейсмические и геофизические исследования подтвердили заявленные и теоретически рассчитанные возможности технологии ПИВ применительно к продуктивным углеводородным пластам. Распространение генерируемых низкочастотных волн сильно зависит от геологических свойств пласта, но в целом может быть эффективным на расстоянии нескольких километров.

При применении ПИВ образовалась воронка, в которой были соединены между собой четыре скважины и при изменении режима работы на одной из скважин остальные немедленно реагировали в виде колебаний динамического уровня жидкости, либо в виде повышения давления в затрубном пространстве.

Проведение микросейсмического мониторинга при применении ПИВ позволяет создать трехмерную модель углеводородного пласта, оценить изменение его проницаемости и спрогнозировать объемы извлечения углеводородов.

Литература

[1] *A.F. Pashchenko, P.G. Ageev*. “Elastic Waves and Plasma – a New Era of Enhanced Oil Recovery”, *AIP Proceedings,* vol. 1738, 2015, pp. 480053-1 – 480053-5.

[2] *V.L. Barabanov, A.V. Nikolaev*. “Problems of Dominant Frequency Range at the Seismic Impact on Oil Deposits”, *Proc. of the III Int. Conf. "The Impact of elastic waves on the fluids in porous media»*, 2012, pp. 30-33.

[3] *M.A. Biot*. “Mechanics of Deformation and Propagation in Popous Media”, *J. Appl. Phys.*, 1962, vol.33 # 4 pp. 1482-1498.

[4] *A.S. Alekseev, G.N. Erokhin, N.L. Podkolodny*. “Expert systems for inverse problems of wave propagation theory”, *Mathematics and Computers in Simulation*, 1989, vol. 31, pp. 517 – 522.

Stochastic identification of heat energy consumption by multi-storey residential buildings based on commercial accounting data

O. V. Stukach[1,2], D. V. Kutuzov[3], A. V. Osovsky[3], N. S. Maltseva[3], V. N. Esaulenko[3]
[1]National Research University Higher school of economics, Moscow, Russia,
[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,
[3]Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia,

Abstract. *A model of a multi-storey building as a linear discrete stochastic system with unknown parameters is proposed. An algorithm based on the least squares method is presented to identify the parameters with the ability to control the accuracy and model dimension. The algorithm was validated from examples of published datasets of real heat consumption and average daily outdoor temperature. The proposed discrete model mathematically represents a control object. It can be further used to design a weather controller in multi-storey residential buildings from instrument metering data only without information about the floor or apartment heat consumption. The robustness and relative simplicity of the model allows to design the algorithm for controlling heat consumption in buildings with similar characteristics and in areas with the same weather conditions. Long-term observations are not required for identification because climate change leads to large deviations in the model coefficients.*

I. Introduction

In the vast majority of cities worldwide a central heating system is broadly used to heat buildings and maintain comfortable living conditions. A special feature of such a system is the control of the generated and used heating energy for the all building or its part. For example, it can be a household metering device. There are many disadvantages to such a system. In particular, different parts of the building can significantly differ in thermal energy consumption due to many unaccounted factors: solar radiation, wind, number of windows, etc. The energy efficiency of buildings cannot be significant with this approach, and it is impossible to assign an energy efficiency class. The consequence is inefficient heating of buildings. In the winter months, the indoor temperature may drop below a comfortable temperature, and in the warmer months there may be exceeding the heating level.

The issue of efficient heat consumption by residential buildings is subject of large number of papers. It purpose is often analysis of existing information about heat transfer processes, search for various dependencies, and obtain methods for energy consumption optimization. Based on the available data on consumption, it was found that various characteristics of houses, such as wall material, year of construction, etc. have a lower impact to the heat efficiency in contrast of ability to regulate its supply [1], which can reduce both energy costs and the living comfort.

Previously, an attempt was made to receive correlations that could be used in estimating the energy consumption of multi-apartment buildings [2]. This method is relatively simple and is able to plan investments in thermal modernization. However, assessing these opportunities and their benefits requires knowledge of various social, technical, and environmental factors.

In general, three types of models are used to estimate the energy consumption of buildings, namely physical, statistical and hybrid models [3–4]. The first is based on a mathematical description of the heat exchange between the building and the environment. The second approach uses statistical methods to determine correlations between building characteristics and energy consumption. Hybrid models use the advantages of both previous ones to calculate the demand for thermal energy based on real data [5–7].

However, there is still potential for further improvements. It is necessary to represent the building as an object of regulation described by a mathematical model to build automatic control of the incoming heat. It is proposed to create such model in the form of a linear discrete stochastic system based on heat consumption data from household metering devices and the average daily temperature according to the Meteorological Center. For example, previously such modeling was carried out in [8] but the goal of regulator design was only in [9].

II. Methods for analyzing the efficiency of heat consumption

The most fundamental researches in the field of heat consumption concerns various methods of increasing the heat efficiency. The article [10] describes various low-cost measures to increase thermal efficiency and provides it comparative analysis where the authors noted that the neural network created identified two best types of work with heating systems. The first sets limits on the maximum heating temperature, the second regulates the heating on and off depends on the outside temperature.

III. Algorithm of stochastic system identification based on the least squares method adding a stop criterion

Identification is proposed to perform by the "basic" algorithm in the paper [11]. The basic algorithm has been updated to include of a stop criterion with a certain measure of accuracy plus the choice of the model dimension based on minimizing the root-mean-square (RMS) error of regulation. The algorithm for the estimation of vector of unknown parameters is based on the consistent application of the least squares method. As a approach of limit accuracy, the authors use adding a choice of system order by estimating the RMS accuracy.

IV. Conclusion

The design of energy efficiency issues is impossible without modeling of buildings as an object of control. The paper presents an algorithm for the building identification. It is easy to implement and can be used to create a thermal energy regulator. The algorithm is based on a well-known basic method, which has been adapted to design the regulator. It allows to accurately describe the change in the amount of energy consumed by a multi-storey building, regardless of the selected period. The algorithm is shown in various examples.

References

[1] *O.V. Stukach, O.O. Gabitova*, "Outcomes of Energy-Saving Regulation of Thermal Energy on the Exam-ple of One Building", *Automatics & Software Enginery*, 2023, no. 2(44), p. 158-164, Elibrary.ru ID 54207953.

[2] *P. Michalak, K. Szczotka, J. Szymiczek*, “Audit-Based Energy Performance Analysis of Multifamily Buildings in South-East Poland”, *Energies*, 2023, vol. 16, p. 4828, doi 10.3390/en16124828.

[3] *T. Walter, M.D. Sohn*, “A regression-based approach to estimating retrofit savings using the Building Performance Database”. *Appl. Energy*, 2016, vol. 179, pp. 996-1005, doi 10.1016/j.apenergy.2016.07.087.

[4] *I.Yu. Popov, O.V. Stukach, P.A. Zorin*, "The Use of Total Variation Outlier Recognizer Method to the Study of Commercial Thermal Energy Accounting Dataset", *Automatics & Software Enginery*, 2021, no. 4(38), p. 55-61, Elibrary.ru ID 49842261.

[5] *R. Olu-Ajayi, H. Alaka, H. Owolabi, L. Akanbi, S. Ganiyu*, “Data-Driven Tools for Building Energy Consumption Prediction: A Review”, *Energies*, 2023, vol. 16, p. 2574, doi 10.3390/en16062574.

[6] *O.V. Stukach, P.A. Zorin, I.A. Ershov*, "The use of the convergent cross mapping method in the problems of studying the cross-dependence of temperature series", *VI International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update" (MSTU-2022)*, March 22-23, 2022, Omsk, Russia, Elibrary.ru ID 48607016.

[7] *C. Li, Z. Ding, D. Zhao, J. Yi, G. Zhang*, “Building Energy Consumption Prediction: An Extreme Deep Learning Approach”, *Energies*, 2017, vol. 10, p. 1525, doi 10.3390/en10101525.

[8] *Z. Li, Y. Han, P. Xu*, “Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: an overview”, *Appl. Energy*, 2014, vol. 124, pp. 325-334, doi 10.1016/j.apenergy.2014.03.020.

[9] *J. Chen-xi, J. Ping, L. Shi*, "Intelligent control method of heating process including model prediction and climate compensation", *2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, Hanoi, Vietnam, 2020, pp. 50-55, doi 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310086.

[10] *D. Altieri, M Patel., J. Lazarus, G. Branca*, “Numerical analysis of low-cost optimization measures for improving energy efficiency in residential buildings”, *Energy*, 2023, vol. 273, p. 127257, Doi 10.1016/j.energy.2023.127257.

[11] *D.V. Kashkovsky, V.V. Konev*, "Sequential identification of a linear dynamic system with random parameters", *Automation and Remote Control*, 2008, no. 8, pp. 82-95.

Релейное управление перевернутым маятником на подвижной тележке при воздействии силы сухого трения

С. А. Кочетков, С. А. Олимова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
kos@ipu.ru, olimovasa@gmail.com

***Аннотация**. В данной работе подробно рассматривается задача управления перевернутым маятником, установленным на подвижной платформе (тележке), которая способна горизонтально перемещаться по направляющей с помощью двигателя постоянного тока. Уникальной особенностью данной конструкции является наличие роликов, которые обеспечивают прижим основания к направляющей, что, в свою очередь, приводит к возникновению значительной силы трения между тележкой и рельсом. В условиях, когда тележка движется, необходимо решить задачу стабилизации маятника в вертикальном положении, одновременно регулируя положение самой тележки. Для достижения этой цели в статье разрабатывается новый разрывной закон управления, который позволяет эффективно компенсировать силу сухого трения. Это решение обеспечивает возможность поддержания маятника в устойчивом состоянии с заданной точностью. Важным аспектом работы является анализ влияния параметров системы на качество управления, что позволяет оптимизировать алгоритмы регулирования. Работа включает в себя экспериментальные данные и примеры применения предложенного подхода, демонстрируя его эффективность в различных сценариях. Результаты показывают, что предложенный метод управления значительно улучшает стабильность системы и позволяет достигать желаемых результатов при минимальных затратах времени на регулирование. Таким образом, данное исследование вносит вклад в развитие теории автоматического управления объектами с нелинейными динамическими характеристиками, такими как перевернутый маятник на тележке. Представленные решения могут быть применены в различных областях, включая робототехнику, аэрокосмическую технику и системы стабилизации.*

I. Введение

В работе рассматривается задача стабилизации угла и регулирования положения перевернутого маятника на тележке с сухим трением. Предлагается разрывный закон управления, обеспечивающий устойчивость системы при значительных возмущениях. В отличие от классических методов (PID, LQR), данный подход эффективно компенсирует нелинейное трение и демонстрирует робастность к изменению параметров. Модель включает механическую и электрическую подсистемы, а синтез управления выполнен на основе блочной канонической формы. Численное моделирование подтверждает эффективность управления по сравнению с аналогами [6, 8, 9].

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

1) в предположении, что в качестве исполнительного устройства, приводящего в движении тележку, используется двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, синтезировать базовый закон разрывного управления, используя приведение к блочной канонической форме управляемости (БКФУ);

2) в предположении наличия всех измерений, разработать моделирование системы.

II. Синтез нелинейного закона управления

Схема и фото экспериментальной установки перевернутого маятника на тележке представлено на рис. 1.

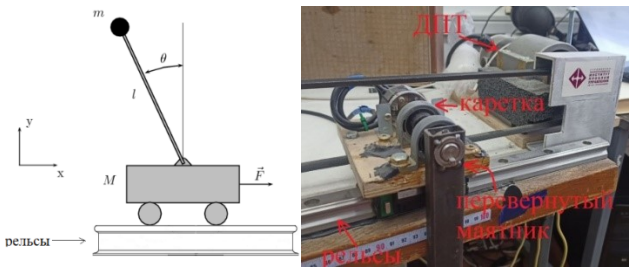


Рис. 1. Схема и экспериментальная установка перевернутого маятника на тележке
(ДПТ – двигатель постоянного тока)

Замкнутая электромеханическая система в невязках с нелинейным управлением представлена ниже

$$\begin{cases} \dot{\tilde{y}_1} = -\tilde{y}_1 + \tilde{y}_2, \\ \dot{\tilde{y}_2} = -\tilde{y}_2 + \tilde{y}_3, \\ \dot{\tilde{y}_3} = -\tilde{y}_3 + \tilde{y}_4, \\ \dot{\tilde{y}_1} = \tilde{I} + s + \xi(t), \\ \dot{\tilde{I}} = -3\tilde{I} - 5\text{sign}(\tilde{y}_4), \\ \dot{s} = 6.9(z) - 3\tilde{I} - 5\text{sign}(\tilde{y}_4), \end{cases} \quad (1)$$

где $z = -325I - 1950v - 7142\text{sign}(s)$.

Моделирование системы на временном промежутке [0; 10] с при желаемом положении маятника x_{ref} = 0,3 [м] представлено на рис. 2.

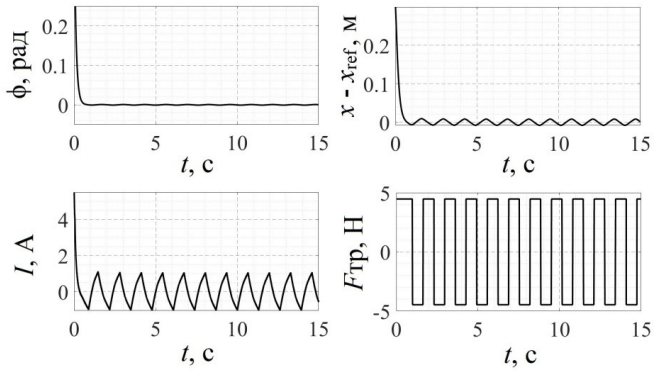


Рис. 2. Моделирование системы при разрывном управлении, полученном
с помощью вихревого алгоритма

Для сравнения была промоделирована система с линейным управлением при помощи PID-регулятора. На рис. 3 ошибки стабилизации угла больше, чем у системы с разрывным управлением, а сила трения компенсируется хуже.

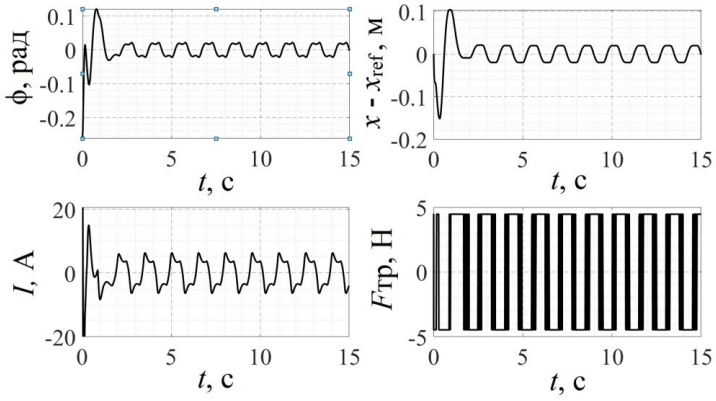


Рис.3. Моделирование системы с линейным управлением (PID-регулятор)

III. Заключение

Цель работы состояла в решении задачи стабилизации маятника в вертикальном положении, одновременно регулируя положение самой тележки. Поставленная цель была достигнута путем разработки нового разрывного закона управления, который позволяет эффективно компенсировать силу сухого трения. Результаты показывают, что предложенный метод управления значительно улучшает стабильность системы и позволяет достигать желаемых результатов при минимальных затратах времени на регулирование.

Дальнейшее направление исследование – применение данного подхода на практике в различных системах.

Литература

[1] *Французова Г.А., Востриков А.С.* Особенности синтеза ПИД-регулятора для нелинейного объекта второго порядка // *АВТОМЕТРИЯ*. 2019. Т. 55, № 4.

[2] *Anita Klosha, G. Leena, Soni M.K.* ABC Algorithm Based Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller for an Inverted Pendulum // *I.J. Intelligent Systems and Applications*, 2014, 06, 29-36.

[3] *Kochetkov S.A.* Relay Control for Inverted Pendulum with Cart under Influence Dry Friction Force // IEEE 978-1-7281-1730-0/19/2019.

Method of mutual navigation of drones in a swarm

D. D. Dmitriev, E. D. Mikhov, A. V. Lykho,
A. B. Gladyshev, V. N. Ratushnyak
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
ddmitriev@sfu-kras.ru, emikhov@sfu-kras.ru, alykho@sfu-kras.ru,
a-glonass@yandex.ru, oborona-81@yandex.ru

Abstract. *Currently, there is a trend toward the use of drones in organized groups or swarms, which significantly enhances their effectiveness. However, this trend is hindered by challenges in their navigation support. Existing coordinate measurement methods that rely on the use of GNSS receivers do not provide the necessary accuracy during autonomous operation. Furthermore, the use of differential modes considerably complicates the algorithms for solving navigation tasks and imposes strict requirements on the data transmission channel for differential corrections. The article proposes a simplified method for measuring the mutual coordinates of drones, based on the use of GNSS receivers from a single constellation of navigation satellites, whose radio navigation signals are used to solve the navigation problem. This method does not significantly complicate the algorithms for solving the navigation task and does not impose strict requirements on the data transmission channel. The results of experimental studies are presented, demonstrating the effectiveness of the developed method.*

I. Introduction

At present, there is a rapid development of various types of drones, which are being utilized across many areas of activity, including cargo delivery, disaster monitoring, patrolling critical infrastructure facilities, reconnaissance, terrain mapping, and much more [1]. In addition, in order to increase the efficiency of drones, the direction of their use in swarms is actively developing, which allows for simultaneous monitoring and mapping of large areas, redistribution of goals and tasks between group members, reduction of the time required to complete an operation due to the uniform distribution of tasks within a group, formation of antenna arrays during radar probing, seamless image stacking during optical probing, etc. [2]. An important factor is also the possibility of using a swarm of small-class drones instead of medium and heavy-class drones, which allows for a significant reduction in operating costs [3]. However, using drones as part of a swarm requires solving one of the main problems – determining the location of each participant within the swarm. This determines both the trajectory safety of the drone swarm and the tactics of its use – the density of the swarm, the tasks to be solved, the possibility of achieving a synergistic effect, etc.

II. Problems of navigation support for drones for their use in a swarm

Modern onboard navigation systems of drones are usually based on GNSS signal receivers, which provide minimal values of weight, dimensions, power consumption and accuracy characteristics acceptable for autonomous navigation [4]. As a rule, the measurement error of plan coordinates in autonomous mode is approximately 10 m for kinematic single-frequency measurements. By using dual-band GNSS receivers and dynamic filtering of measured parameters, the measurement error of navigation parameters in real time can be reduced to 1 m. However, such a magnitude of coordinate measurement error does not allow achieving a synergistic effect through the use of drones in a swarm – seamless addition of optical images during joint survey of the earth's surface, construction of antenna arrays from drones during radar sounding and radio reconnaissance, high-precision following of the trajectory of movement, refueling on the move, etc. The use of inertial sensors (accelerometers and gyroscopes) in integrated onboard navigation systems significantly increases the weight, dimensions and cost of the navigation system, and cheap strapdown inertial sensors have insufficient accuracy and reliability characteristics.

The main reason for such an error is a fairly large value of external components in the error budget – ephemeris, tropospheric, ionospheric, etc. One of the ways to solve this problem is to use differential modes of GNSS receivers, which allow achieving an error in measuring coordinates based on code measurements of 20...30 cm, but their use requires the presence of differential correction stations and

the organization of a correction transmission channel. In addition, the use of differential GNSS operation mode does not solve the main problem of using a drone swarm – the lack of mutual navigation between the swarm members.

III. Measuring mutual coordinates of drones in a swarm

When using a drone swarm, the error in the mutual positioning of the swarm members among themselves is much more important, the magnitude of which determines the tactics of its use - the density of the swarm, the degree of autonomy of the swarm members, the possibility of joint target use, etc. In this case, it is possible to use methods for measuring relative coordinates, which allow reducing the share of external components in the overall error budget. These are such types of errors as tropospheric, ionospheric, ephemeris and others, common to closely located GNSS receivers. External components of the pseudorange determination error do not depend on the type of equipment and will be practically the same for closely located GNSS receivers. This implies the fundamental possibility of significantly improving the accuracy of coordinate measurement in the relative mode. In this case, the measurement of the absolute coordinates of the drones is carried out with standard accuracy, and they are positioned among themselves with a much smaller error – units of centimeters [5]. The main advantages of these methods are the absence of control and correction stations and the need to organize communication channels with the Internet.

In the case of measuring relative coordinates, the difference in pseudo-ranges ΔR from the same navigation spacecraft R_1 and R_2 between two GNSS receivers A_1 and A_2 with coordinates (x_1, y_1, z_1) and (x_2, y_2, z_2) respectively is used as a navigation parameter. The difference in pseudoranges for measuring the relative coordinates of GNSS receivers can be found from the linear equation:

$$\Delta R = R_2 - R_1 = k_x \Delta x + k_y \Delta y + k_z \Delta z + c\Delta\tau + (\delta 2 - \delta 1), \quad (1)$$

where $k_x = \frac{\left(x_{mp} - (x_1+x_2)/2\right)}{(R_1+R_2)/2}$, $k_y = \frac{\left(y_{mp} - (y_1+y_2)/2\right)}{(R_1+R_2)/2}$, $k_z = \frac{\left(z_{mp} - (z_1+z_2)/2\right)}{(R_1+R_2)/2}$ – direction cosines of the direction vector to the navigation spacecraft from the midpoint between the GNSS receivers A_{mp}; $\Delta x = (x_1 - x_2)$, $\Delta y = (y_1 - y_2)$, $\Delta z = (z_1 - z_2)$ – relative coordinates of GNSS receivers; $\Delta\tau = \tau_1 - \tau$ – relative departure of time scales.

Since the calculation of the direction cosines k_x, k_y, k_z of the direction vector to the navigation spacecraft from the midpoint between the GNSS receivers in (1) requires knowledge of their coordinates, the problem must be solved in two stages. At the first stage, the coordinates of both GNSS receivers are determined in autonomous mode, which are used to solve the problem of determining relative coordinates at the second stage. The residual measurement error corresponds to the error in the differential mode, i.e. 0.5…1.5 m. One of the main disadvantages of the considered method of measuring relative coordinates is the need for simultaneous measurements by both GNSS receivers or correction of the measured pseudorange by one GNSS receiver taking into account measurements made at different times. The specified requirement requires the organization of a fairly active exchange of information between onboard GNSS receivers. It is necessary to transmit the coordinates of drones measured in autonomous mode, pseudo-range values for each navigation spacecraft and all radio navigation signals involved in solving the navigation task, measurement time, time scale deviation values, etc. [6]. Considering that a drone swarm can have dozens of members, the computational complexity of algorithms for calculating relative coordinates increases sharply, and the organization of data transmission channels significantly increases the load on the drone's onboard communication systems.

The above-mentioned drawback can be eliminated by using a simplified method of measuring mutual coordinates, which consists of using GNSS receivers to solve the navigation problem and calculate the mutual coordinates of a single constellation of navigation spacecraft. Considering that in this case the external components of the error for GNSS receivers will be the same, this method will improve the accuracy of measuring mutual coordinates with a sharp reduction in the requirements for computing resources and the communication channel - it is enough to transmit the composition of the used constellation of navigation spacecraft and the coordinates of the GNSS receiver, measured in autonomous mode. Let us consider the results of experimental studies of the proposed method. During the experiment, two GNSS receivers were used, with the help of which the measured pseudoranges were

recorded for all visible GLONASS navigation devices in the amount of N = 5 000 measurements. Then, the solution of the navigation problem was performed using the pseudoranges measured for all navigation devices and for navigation devices that are common to both GNSS receivers. Fig. 1 shows the results of measuring the distance $L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ between GNSS receivers, calculated from autonomous measurements (red curve) and using the proposed method – a single constellation of navigation spacecraft (black curve).

Fig. 1. Results of L measurement based on autonomous measurements (in red) and using a single constellation of navigation spacecraft (in black)

The results of the measurements show that the use of a single constellation of navigation spacecraft significantly reduces the measurement error of navigation parameters by GNSS receivers. Analyzing the graphs in Fig. 1, it can be seen that when using coordinates measured autonomously by GNSS receivers (red curve), abrupt changes are observed, caused by the difference in the constellations of navigation spacecraft, the signals of which the GNSS receivers use to solve the navigation problem. The use of the proposed method for solving the navigation problem eliminates such jumps. Also, the reduction in error is confirmed by the statistical characteristics of the measurement results – the standard deviation decreased from 0.86 m to 0.41 m.

IV. Conclusion

Thus, the use of GNSS receivers from a single constellation of navigation spacecraft significantly reduces the measurement error of mutual coordinates, which allows drones to be used as part of swarms that do not require centimeter-level accuracy in determining their mutual location. These are possible applications such as conducting group reconnaissance, monitoring natural disasters, conducting search and rescue operations, delivering cargo, patrolling remote area and extended objects, etc. The proposed method of measuring mutual coordinates practically does not complicate the algorithms for solving the navigation problem and does not impose strict requirements on the data transmission channel. It is sufficient to transmit information about one's own measured coordinates and the composition of the constellation of navigation spacecraft, the signals of which are used to solve the navigation problem.

Acknowledgments

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-19-20070, https://rscf.ru/project/25-19-20070/, and a grant from the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

References

[1] *B. Al-zahrani, Omar Sami Oubbati, A. Barnawi, M. Atiquzzaman, D. Alghazzawi,* "UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges", *Journal of Network and Computer Applications*. 166(1), 2020.

[2] *S.Yu. Kurochkin, A.A. Tachkov*, "Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots", *Mechatronics, Automation, Control,* 22(6), 2021, pp.04–312.

[3] *J. Richardson*, "The coming drone swarm. Swarming UAVs demonstrate enormous attack potential. But the technology still needs to be proven and trusted", *Defence Procurement International*, 2017.

[4] *P. Tong, X. Yang, Y. Yang, W. Liu, P. Wu*, "Multi-UAV Collaborative Absolute Vision Positioning and Navigation: A Survey and Discussion", *Drones*, 7(261), 2023.

[5] *D.D. Dmitriev, V.N. Tyapkin, Yu.L. Fateev*, "Methods of Mutual High-Precision Navigation Based the Use of Relative Modes of Anglemeasuring Receivers of Global Navigation Satellite Systems Signals", *Spacecrafts & Technologies*, 2(40), 2022, pp. 123–132.

[6] *V.N. Ratushnyak, A.B. Gladyshev, N.S. Kremez, et al.*, "Organization of Mutual High-Precision Navigation of Small Spacecraft of Low-Orbit Groups", *Proceedings of 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2020.

Оценка параметров положения и движения объекта при линейном и нелинейном сглаживании

А. Е. Якушина, И. Л. Щербов, В. В. Паслён
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия,
yakuann@yandex.ru, scherbov@yandex.ru, paslen@yandex.ru

Аннотация. *Повышение точности и достоверности получаемой информации о траектории движения различных систем и объектов, маневрирующих в пространстве необходимы для принятия обоснованных решений о характеристиках испытуемого объекта и качестве его работы в соответствии с утвержденным техническим заданием на разработку. Траектория движения систем и объектов рассматривается как совокупность некоторого числа параметров, являющихся компонентами вектора положения и движения на интервале наблюдения. Рассмотрен рекуррентный метод ортогонализации Шмитда по системе неортогональных линейно независимых базисных функций и трехчленная рекуррентная формула, вытекающая из этого метода. Определены свойства ортогонализации на интервале наблюдения и порядок вычисления оценки коэффициентов сглаживающего полинома. Установлено, что благодаря ортогональности базисных функций, представляется возможным получить более высокую точность вычисления оценок коэффициентов сглаживающего полинома так как в этом случае определитель Грамма существенно отличается от нуля. Предложены выражения для получения значений аппроксимирующего полинома, которые с достаточно высокой точностью и достоверностью позволяют осуществить оценку параметров положения и движения систем и объектов в пространстве.*

I. Введение

При проведении летных испытаний различных систем и объектов маневрирующих в пространстве, необходимо с высокой точностью и достоверностью оценить траекторию их движения по данным измерений, полученных с применением траекторных измерительно-вычислительных комплексов, использующих современные информационно-коммуникационные технологии и которые представляют собой совокупность систем: вычислительных, внешнетраекторных измерений, единого времени, автоматического съема и передачи информации [1-3].

Существующие измерительно-вычислительные комплексы обеспечивают сбор необходимой траекторной информации положения и движения испытываемых систем и объектов, которая в последующем используется для анализа качества выполнения технического задания на проектирование и принятия решения на их готовность для введения в эксплуатацию.

В общем случае траекторию движения систем и объектов, можно представить совокупностью некоторого числа параметров, позволяющих с высокой точностью оценить траекторию, скорость и ускорения их движения на интервале наблюдения.

Учитывая, что в настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), возникает необходимость совершенствования алгоритмов обработки данных внешнетраекторных измерений при их испытаниях. Это обусловлено тем, что внешнетраекторные измерительные средства по сути являются единственным источником получения информации о положении БПЛА в пространстве и параметров его движения (скорости и ускорения), так как другие системы и средства контроля перемещения, например бортовые навигационные комплексы, не могут быть размещены на БПЛА из-за их габаритов.

В работах [4-16] исследованы алгоритмы оперативной оценки координат маневрирующих летательных аппаратов (ЛА), полученные на основе динамической модели движения и алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений. Однако в данных работах исследованные алгоритмы позволяют определить либо только параметры положения ЛА и не позволяют оценить параметры их движения, либо представляют собой

сложную структуру и не обеспечивают достаточно высокую точность оценки параметров движения из-за невозможности с высокой степенью вероятности определить параметры внешних воздействий на ЛА.

В настоящей работе предложена методика применения систем ортогональных базисных функций, направленная на повышение точности и достоверности оценки параметров положения и движения ЛА.

II. Основная часть

Траектория движения ЛА считается известной, в случае если в любой момент временного интервала наблюдения возможно определить его текущее положение *r (t, A)*.

В общем случае траекторию движения ЛА можно представить совокупностью некоторого числа параметров – компонент вектора *A*, позволяющих с достаточной точностью оценить траекторию движения ЛА на интервале наблюдения.

С этой целью из известного множества систем линейно независимых базисных функций (ЛНБФ) на наш взгляд наиболее целесообразным является применение системы ортогональных базисных функций (ОБФ) $P_0(t)$, ..., $P_k(t)$, ..., $P_m(t)$, на множестве точек *1, ..., n* или на интервале $[t_1, \dots, t_n]$.

Тогда свойство ортогональности на множестве точек *1, ..., n* можно представить соотношением [14]:

$$P_{æ}^{\mathrm{T}} P_k = (P_æ P_k) = \sum_{i=1}^{n} P_æ(t_i) P_k(t_i) = \begin{cases} 0 \text{ при } æ \neq k \\ |P_k|^2 \text{ при } æ = k \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{æ}^{\mathrm{T}} = |P_æ(t_1) \dots P_æ(t_i) \dots P_æ(t_n)|$; P_k – k столбец матрицы P; i = 1, …, n.

При условии, что приближение к истинной траектории $\xi_n(t)$ определяется выражением:

$$\xi_n(t) = \sum_{k=0}^{m} a_k P_k(t), \quad (2)$$

где a_k – составляющая вектора A; P_k – k столбец матрицы P; k = 1, …, m.

Следовательно, с учетом ортогональности базисных функций оценка коэффициентов сглаживающего полинома $\hat{a}_k$ вычисляется из соотношения [13, 14]:

$$\hat{a}_k = \frac{P_k^{\mathrm{T}} \xi_u}{P_k^{\mathrm{T}} P_k}, \quad (3)$$

где ξ_u – вектор истинных значений параметра; k=0,….,m.

Таким образом, благодаря ортогональности базисных функций, получаем более высокую точность вычисления оценок коэффициентов $\hat{a}_k$, так как определитель Грамма существенно отличается от нуля.

При этом оценка каждого коэффициента выражается через значение только одной соответствующей ему функции P_k(t).

В сравнении с неортогональными функциями сочетание метода наименьших квадратов с ОБФ:

- обеспечивает более высокую точность вычисления оценок коэффициентов $\hat{a}_k$ (3);
- исключает необходимость пересоставления и повторного решения систем нормальных уравнений при изменении степени m аппроксимирующего полинома и позволяет обеспечить приближение к истинной траектории полиномом любого порядка m≤n-1.

Известно, что ортогональный базис имеет неоспоримые преимущества в сравнении с неортогональным [14].

Так, метод ортогонализации Шмитда по системе ЛНБФ, является рекуррентным, так как нельзя построить последующую функцию без построения предыдущей. Тогда на основе метода ортогонализации Шмитда можно рассмотреть трехчленную рекуррентную формулу:

$$P_{k+1}(t) = (t - \alpha_k) P_k(t) - \alpha_{k-1} P_{k-1}(t), \quad (4)$$

где $\alpha_k = \frac{P_k^T \, t \, P_k}{P_k^T \, P_k}$, $\alpha_{k-1} = \frac{P_{k-1}^T \, t \, P_k}{P_{k-1}^T \, P_{k-1}}$.

Рекуррентная формула (4) может быть использована при условии, что необходимые для начала итерационного процесса $P_0(t)=1$, $P_1(t)=t$.

Трехчленная формула проще чем метод ортогонализации Шмидта. Для её применения нет необходимости использовать какую-либо систему ЛНБФ. Достаточно знать две предыдущие ортогональные функции, что может всегда быть обеспечено выбором $P_0(t)=1$, $P_1(t)=t$.

После построения системы ортогональных функций по формуле (3) определяются все коэффициенты $\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_k, \dots, \hat{a}_m$. Это позволяет представить приближение истинного параметра траектории аппроксимирующим полиномом:

$$\xi_n\ (t) = \sum_{k=0}^{m} \hat{a}_k\ P_k(t) \tag{5}$$

Исходя из этого, приближение скорости и ускорения представляется возможным оценить, используя следующие соотношения:

$$\xi_n'(t) = \sum_{k=1}^{m} \hat{a}_k\ P_k'(t) \tag{6}$$

и

$$\xi_n''(t) = \sum_{k=2}^{m} \hat{a}_k\ P_k''(t) \tag{7}$$

III. Заключение

Таким образом, применение систем ортогональных базисных функций и предложенной трехчленной рекуррентной формулы позволяет с достаточно высокой точностью и достоверностью осуществить оценку параметров положения и движения ЛА, а предложенные формулы (5 - 7) позволяют решать интерполяционные задачи.

Литература

[1] *Огоднийчук, Н.Д.* Обработка траекторной информации. Ч. 1 / *Н. Д. Огороднийчук.* – Киев : КВВАИУ, 1981. – 141 с.

[2] *Жданюк, Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений / *Б.Ф. Жданюк.* – Москва : Сов. радио, 1978. – 384 с.

[3] *Еналеев, С.Ф.* Траекторные измерения: практическое пособие / *С.Ф. Еналеев*. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 124 с.

[4] *Голубков, А.В.* Обнаружение и идентификация режима движения объекта по сложной траектории / *А.В. Голубков* // Дифференциальные уравнения, математическое моделирование и вычислительные алгоритмы: Сборник материалов международной конференции, Белгород, 25–29 октября 2021 года. – Белгород : Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – С. 87-89.

[5] *Кузнецов, А.А.* Методика повышения точности траекторных измерений с использованием алгоритмов оперативной оценки координат маневрирующих летательных аппаратов / *А.А. Кузнецов, Ю.О. Жуков, О.Н Кузнецова* // *Вестник метролога*. – 2023. – № 3. – С. 31-34.

[6] *Медведев, Д.М.* Структуры и алгоритмы обработки данных в системах автоматизации и управления / *Д.М. Медведе*в. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 100 с.

[7] *Никитина-Кошкина, К.Э.* Методика обнаружения траектории летательного аппарата / *К.Э. Никитина-Кошкина, С.А. Никитин-Кошкин, Г.В. Кошкина, Н.А. Стукалова* // Моделирование нелинейных процессов и систем: Материалы седьмой международной конференции, Москва, 20–23 декабря 2023 года. – Москва : Янус-К, 2024. – С. 158-159.

[8] *Паслён, В.В.* Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функций / *В.В. Паслён, И.Л. Щербов* // *Вестник Академии гражданской защиты*. Выпуск 1 (25). – Донецк : АГЗ, 2021. – С. 48-53.

[9] *Целых, А.Н.* Современные методы прикладной информатики в задачах анализа данных / *А.Н. Целых, А.А. Целых, Э.М. Котов.* – Ростов-на-Дону, Таганрог : *Издательство Южного федерального университета*, 2021. – 130 с.

[10] *Щербов, И.Л.* Алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений / *И.Л. Щербов* // *Управление большими системами*: Сборник трудов. – Вып. 113. – Москва : ИПУ РАН, 2025. - С.37-57.

[11] *Щербов, И.Л.* Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений / *И.Л. Щербов* // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. Том 28. Выпуск 3. – Москва, Зеленоград : НИУ «МИЭТ», 2023. – С. 378-384.

[12] *Щербов, И.Л.* Информационная технология обработки данных траекторного контроля / *И.Л. Щербов* // *Вестник Донецкого национального университета*. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 1. – С.71-77.

[13] *Щербов, И.Л.* Исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома / *И.Л. Щербов* // *Известия ЮФУ. Технические науки*. Выпуск 3 (230). – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2023. – С. 134-143.

[14] *Щербов, И.Л.* Исследование области определения параметров базисной функции двух аргументов при построении λ-ортогональной базисной функции / *И.Л. Щербов* // *Известия ЮФУ. Технические науки*. Выпуск 6 (230). – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2022. – С. 106-116.

[15] *Amelina, N.* Consensus-based distributed algorithm for multisensor-multitarget tracking under unknown-but-bounded disturbances / *N. Amelina, V. Erofeeva, O. Granichin* // IFAC-PapersOnLine : 21st, Berlin, 12-17.07.2020. Vol. 53. – Berlin, 2020. – P. 3589-3595. – DOI 10.1016/j.ifacol.2020.12.1756.

[16] *Paslyon, V.V.* Joint processing of ground and air information / V.V. Paslyon, I.L. Shcherbov, M.V. Mikhailov, K.I. Motylev // Materials of final international scientifically-practical conference “The Science: theory and practice.” Vol 27. Engineering science. – Praha : Publishing House “Education and Science”, s.r.o.; Prague, Czechia – Dnepropetrovsk, Ukraine – Belgorod, Russian, 2005. – P. 6-9.

Determination and optimization of the parameters of the technological operation of two-beam laser cutting of silicate glass using a genetic algorithm and neural networks

V. A. Prokhorenko, Yu. V. Nikityuk, V. S. Smorodin, D. L. Kovalenko
Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus,
Nikitjuk@gsu.by

***Abstract**. This work investigates the numerical modeling and optimization of dual-beam laser cleaving for silicate glasses. Thermoelastic stresses and temperature fields were computed via quasi-static finite element analysis using FEniCS. A modified genetic algorithm optimized laser power, speed, and spot radius to maximize tensile stress and processing speed. Neural network approximations yielded errors below 4% for temperature and 5% for stress. A real-time adaptive control method based on neuroregulators was developed to maintain processing precision and stability.*

I. Introduction

Laser cleaving of silicate glasses relies on localized thermal loading and rapid cooling to induce controlled cracks, offering high precision and structural integrity [1–3]. Dual-beam laser setups enhance process efficiency by improving temperature-stress distribution. Optimization of processing parameters using genetic algorithms allows effective global search for maximum performance [4]. Despite optimal preplanning, external and internal disturbances—such as laser instability and material variability—can compromise results. To address this, a neuroregulator-based adaptive control system was developed to ensure stable, real-time correction under fluctuating conditions [5].

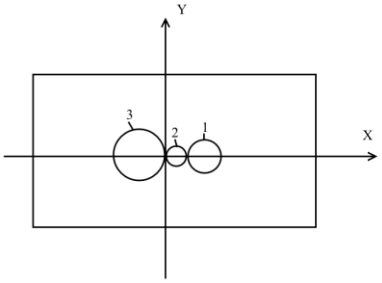


Fig.1. Scheme of the laser cutting process, top view: 1 – zone affected by laser with a wavelength of 10.6 μm, 2 – zone affected by laser with a wavelength of 1.06 μm, 3 – zone affected by refrigerant; the laser beam and coolant spot move from left to right

II. Finite Element Analysis

Thermoelastic stresses and temperature fields during dual-beam laser cleaving were computed using a quasi-static, uncoupled thermoelasticity formulation. Numerical modeling was implemented in Python with FEniCS [6]. Simulations used a 30×40×4 mm glass plate discretized into ~25,520 finite elements. Multi-objective optimization methods were applied to refine technological parameters [7].

Key process parameters included movement speed (v), laser powers at 10.6 μm (P_0) and 1.06 μm (P_1), and beam spot radii (R_0 for 10.6 μm, R_1 for 1.06 μm, R_2 for coolant). Target responses were maximum tensile stress (σ_{yy}) and maximum temperature (T_{max}). R_1 and R_2 were fixed at 1 mm; v, P_0, P_1, and R_0 were optimized using a genetic algorithm supported by neural network approximators. A total of 375 finite element simulations were performed, varying parameters within: v = 0.005–0.05 m/s, P_0 = 4–20 W, P_1 = 20–80 W, and R_0 = 1–4 mm.

III. Neural Network Approximation of Responses

Neural network approximators for maximum temperature and tensile stress were trained on simulation data using multilayer perceptrons implemented in Keras. Candidate three-layer architectures

with varying neuron counts in the first two hidden layers were evaluated by cross-validation, optimizing mean squared error (MSE) and coefficient of determination (R^2) to select optimal models [8].

Figure 2 shows heatmaps of average MSE values for neural network approximators of maximum tensile stress (left) and maximum temperature (right). Based on the results, architectures 120-60-1 and 100-80-1 were selected for σ_{yy} and T_{max}, respectively. Figure 3 displays the evolution of evaluation metrics during training of the neural network models.

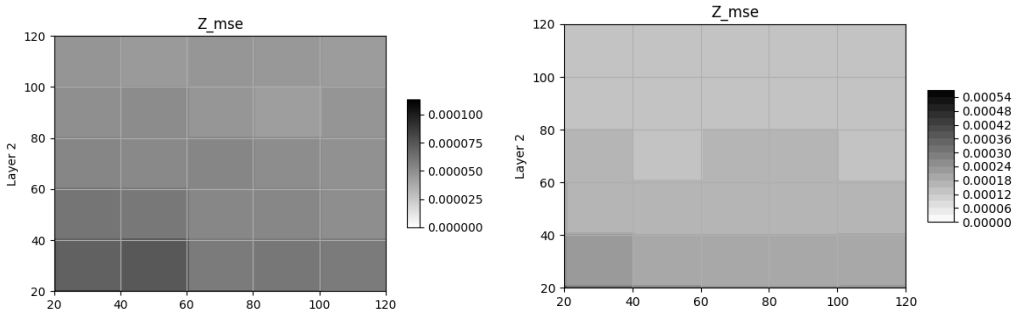


Fig.2. Heatmaps showing average MSE values for the neural network approximators of maximum tensile stress (left) and maximum temperature in the processing zone (right)

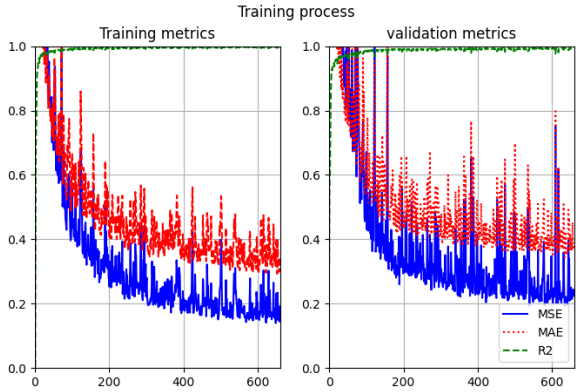


Fig.3. The example Metrics of a neural network approximator during training

IV. Neural Network Approximation of Responses

Process parameters were optimized using a multi-objective genetic algorithm with a population size of 250 per generation. The objective function targeted maximization of tensile stress and processing speed. Constraints included adherence to the parameter ranges used for neural network training and a temperature limit of 789 K to ensure valid thermal cleaving conditions.

Optimization results are shown in Table 1, with values in parentheses indicating those from finite element simulations. The maximum relative error between genetic algorithm outputs and FEM results did not exceed 4% for temperature and 5% for thermoelastic stress.

Table 1. Optimization Results

P_0	P_1	R_1	σ_{yy}	T_{max}
15.8	79.7	0.0032	125 MPa	776 K
			(126.3 MPa)	(748 K)

V. Adaptive Control of the Dual-Beam Laser Cleaving Process

The neuroregulator construction algorithm [5] follows a sequence starting with the definition of adaptation quality criteria, model training, and validation on a sample dataset. The criterion focuses on maintaining process stability while optimizing processing speed and tensile stress. Reinforcement learning algorithms [9-10] were used to build the neuroregulator, with the simulation model [5] serving as the environment for learning. The dynamics of the average adaptation quality evaluation function are shown in Figure 4.

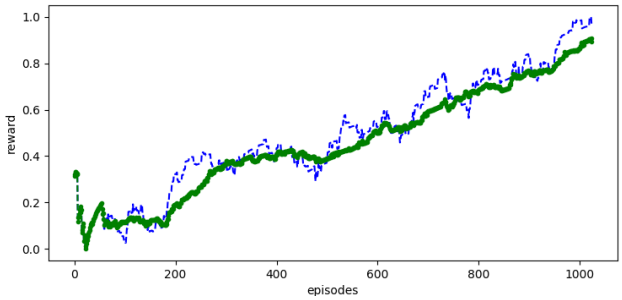


Fig.4. Dynamics of the average adaptation quality evaluation function

VI. Conclusion

A computational model was developed using the finite element method in a quasi-static formulation and the FEniCS library to determine temperature fields and thermoelastic stresses in the laser-affected zone. A modified genetic algorithm was used for multi-objective optimization to identify parameters for effective silicate glass separation, focusing on maximizing tensile stresses and processing speed. A regression model was constructed, showing errors of no more than 4% for temperature and 5% for stresses compared to neural network approximations. Additionally, an adaptive control approach using neuroregulators was proposed to stabilize laser cutting parameters under variable conditions.

References

[1] *R.M. Lumley*, "Controlled separation of brittle materials using a laser," Am. Ceram. Soc. Bull., vol. 48, pp. 850–854, 1969.

[2] *S. Nisar, L. Li, M. Sheikh*, "Laser glass cutting techniques—a review," *J. Laser Appl*., vol. 25, no. 4, pp. 042010-1–11, 2013.

[3] *J. Junke, W. Xinbing*, "Cutting glass substrates with dual-laser beams," *Opt. Lasers Eng*., vol. 47, pp. 860–864, 2009.

[4] *P. Parandoush, A. Hossain*, "A review of modeling and simulation of laser beam machining," *Int. J. Mach. Tools Manuf.,* vol. 85, pp. 135–145, 2014.

[5] V.*A. Prokhorenko, Y.V. Nikitjuk, V.S. Smorodin*, "Adaptive control system for technological operation of laser processing of brittle non-metallic materials," *Probl. Phys. Math. Tech*., vol. 4, no. 61, pp. 78–81, 2024. *https://doi.org/10.54341/20778708_2024_4_61_78.*

[6] FEniCS Project, *https://fenicsproject.org*, accessed January 3, 2025.

[7] Y.*V. Nikitjuk, V.A. Prokhorenko, A.I. Kulyba*, "Multi-criteria optimization of quartz glass laser cutting parameters using neural network simulation and genetic algorithm," *Probl. Phys. Math. Tech*., vol. 3, pp. 26–31, 2023. https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_26.

[8] *Y.V. Nikitjuk, A.V. Semchenko, V.V. Sidsky, et al.,* "Prediction of the properties of semiconductor $ZnMgO_{x\gamma}$ sol-gel layers using artificial neural networks," Probl. Phys. Math. Tech., vol. 1, pp. 28–32, 2022. *https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_28.*

[9] *R.S. Sutton, A.G. Barto*, Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd ed., Cambridge: MIT Press, 2018, 552 p.

[10] *S. Amin, M. Gomrokchi, H. Satija, et al.,* "A survey of exploration methods in reinforcement learning," arXiv preprint, 2021. *https://arxiv.org/abs/2109.00157.*

Определение параметров лазерного раскалывания кристаллического кварца с использованием нейро-нечетких сетей

Ю. В. Никитюк[1], Л. Н. Марченко[1, 2], Х. Чжан[3], А. Чжан[3]

[1]Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь,
[2]Научно-образовательный математический центр «Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской» Псковского государственного университета, г. Псков, Россия,
[3]Нанкинский университет науки и технологий, г. Нанкин, Китайская Народная Республика,
nikitjuk@gsu.by, lmarchenko@gsu.by

Аннотация. *Работа посвящена построению нейро-нечеткой модели ANFIS лазерного раскалывания кристаллического кварца. Температуры и термоупругие напряжения рассчитывались на языке программирования APDL. Определение термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для трех различных вариантов: I – анализ среза zy при перемещении лазерного пучка в направлении оси X; II – анализ среза yx при перемещении лазерного пучка в направлении оси X; III – анализ среза xy при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z. В модуле DesignXplorer программы ANSYS с использованием гранецентрированного варианта центрального композиционного плана численного эксперимента был получен набор данных для создания модели ANFIS. В качестве входных параметров рассматривались скорость обработки, геометрические параметры эллиптического лазерного пучка, мощность CO_2-лазера и толщина кварцевой пластины, выходных – температуры и термоупругие напряжения. Эффективность модели определялась на основе статистических метрик. Показано, что предложенная модель обладает удовлетворительной точностью.*

I. Введение

В настоящее время возрастают требования к точности и качеству обработки хрупких неметаллических материалов, в том числе различных кристаллов, что в свою очередь определяет важность моделирования процессов лазерного раскалывания кристаллического кварца. Одним из эффективных способов обработки хрупких материалов является лазерное раскалывание. Эта технология основана на создании локальных термоупругих напряжений в материале за счет комбинированного воздействия лазерного излучения и охлаждающей среды. При этом отмечается высокая точность резки, минимальное повреждение материала, а также высокая производительность [1-2].

Использование методов искусственного интеллекта в настоящее время является эффективным инструментом для изучения процессов лазерной обработки материалов и улучшения управления такими процессами с целью достижения высокого качества обработки. Искусственные нейронные сети, а также нечеткие системы успешно применяются для исследования процессов лазерной обработки, в том числе лазерного раскалывания кристаллического кварца [3-7].

Целью настоящего исследования является построение нейро-нечеткой модели ANFIS лазерного раскалывания кристаллического кварца для изучения параметров обработки на максимальную температуру и максимальное напряжение растяжения, формируемые в зоне обработки.

II. Основная часть

Для построения нейро-нечеткой модели ANFIS использовались результаты численного эксперимента, реализованного на языке программирования APDL. Моделирование температурных полей и термоупругих напряжений, возникающих в процессе лазерного раскалывания кристаллического кварца, проводилось в квазистатической постановке с

использованием несвязанной задачи термоупругости. Исследования выполнялись на квадратных пластинах с размерами 20×20 мм, при этом толщина образцов варьировалась в диапазоне от 0,5 до 2 мм. Моделирование осуществлялось для условий воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. В эксперименте применялись стандартные начальные ориентации кристаллических образцов квадратной формы [7].

Определение термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кварцевой пластине, в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента осуществлялось для трех различных вариантов: I – анализ среза *zy* при перемещении лазерного пучка в направлении оси X; II – анализ среза *yx* при перемещении лазерного пучка в направлении оси X; III – анализ среза *xy* при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z. Численный эксперимент в модуле DesignXplorer программы ANSYS предполагал формирование центрального композиционного плана. Влияющими параметрами были: P1 – скорость обработки (*V*), P2 и P3 – большая полуось (A) и малая полуось (B) эллиптического лазерного пучка соответственно, P4 – мощность (P) CO_2-лазера, P5 – толщина кварцевой пластины (H). В соответствии с планом численного эксперимента расчеты выполнялись для 27 комбинаций параметров, для которых были определены значения максимальных температур T1, T2, T3 соответственно для трех вариантов обработки квадратной кварцевой пластины, описанных выше, и трех соответствующих значений максимальных напряжений растяжения S1, S2, S3, действующих перпендикулярно фронту лазерно-индуцированных трещин. Далее проводилось построение нейро-нечеткой системы ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), представляющей собой гибридную систему, сочетающую нейронные сети и нечеткую логику, которая широко применяется для моделирования сложных систем и прогнозирования. Оптимизация и обучение функций принадлежности выполняется согласно алгоритмам построения искусственных нейронных сетей [8].

Для прогнозирования максимальных температур (T1, T2, T3) и максимальных напряжений растяжения (S1, S2, S3) в зависимости от параметров обработки разработана нейро-нечеткая система вывода на основе лингвистических переменных входных параметров. На слое фаззификации четкие входные параметры преобразовывались в нечеткие с использованием соответствующих функций принадлежности. При моделировании рассматривались правила Сугено if-then с линейными функциями вывода. Обучение нейро-нечеткой модели ANFIS проводилось на наборе данных, полученных в результате численного эксперимента. Для обучения сети использовался гибридный метод обучения – комбинация метода градиентного спуска и метода наименьших квадратов.

Для оценки полученных нейро-нечетких моделей были использованы следующие критерии: коэффициент детерминации R^2, средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE), средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE).

В таблице 1 представлены значения статистических метрик нейро-нечеткой модели ANFIS для выходных параметров максимальных температур (T1, T2, T3) и максимальных напряжений растяжения (S1, S2, S3). Построенная модель обладает удовлетворительной точностью в сравнении с моделями нейронных сетей, рассматриваемыми в [7].

Таблица 1. Результаты оценки

	T1	T2	T3	S1	S2	S3
RMSE	66 K	53 K	66 K	9.9E+06 Па	1.1E+07 Па	8.3E+06 Па
MAE	60 K	49 K	60 K	7.9E+06 Па	9.3E+06 Па	7.3E+06 Па
MAPE	7.2 %	5.9 %	7.0 %	11.2%	10.3%	11.3%
R^2	0.9490	0.9601	0.9522	0.7808	0.9222	0.8553

Нейро-нечеткая модель ANFIS формирует достаточно гладкую поверхность, которая показывает высокую точность моделирования. Например, трехмерный график разработанной нейро-нечеткой модели ANFIS зависимости максимальной температуры (T1 = output, K) от скорости обработки (V = input2, м/с) и мощности CO_2-лазера (P = input4, Вт), представлены на

рисунке 1. Имеет место гладкая нелинейная зависимость, характеризующая влияние скорости обработки и мощности CO_2-лазера на максимальную температуру T1.

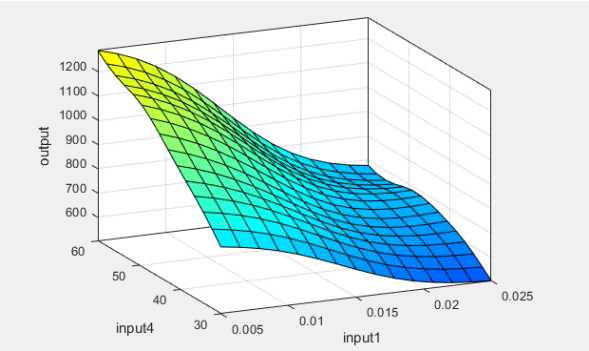


Рис. 1. Трехмерный сетчатый график разработанной нейро-нечеткой модели ANFIS зависимости максимальной температуры (T1 = output, K) от скорости обработки (V = input2, м/с) и мощности CO2-лазера (P = input4, Вт)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия нейро-нечеткой модели ANFIS результатам конечно-элементного анализа. Результаты моделирования лазерной обработки алмазов с использованием искусственных нейронных сетей, представленные в работе [12], оказались несколько лучше результатов моделирования с применением нейро-нечеткой модели ANFIS, однако для формирования нейросетевых моделей потребовалась на порядок большая обучающая выборка.

III. Заключение

В результате выполненных исследований показана возможность определения режимов лазерного раскалывания кристаллического кварца на основе сочетания метода конечных элементов и нейро-нечеткой модели ANFIS, которые дают достаточную эффективность.

Литература

[1] *V. Kondratenko, S. Kudzh*, “Precision Cutting of Glass and Other Brittle Materials by Laser-Controlled Thermo-Splitting”, *Glass and ceramics*, no. 74, 2017, pp.75-81.

[2] *Laser cleaving of brittle non-metallic materials*, Yu. V. Nikityuk, A. A. Sereda, A. N. Serdyukov, Francisk Skorina Gomel State University, Gomel: Francisk Skorina Gomel State University, 2025, 217p.

[3] *Prashant P Kharche and Vijay H Patil,* "Systematic review of optimization techniques for laser beam machining." Engineering Research Express, Vol 6, № 2, 2024.

[4] *Y. Nikityuk, A. Serdyukov, I. Aushev*, “Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass”, *Journal of Optical Technology*, Vol. 89, №. 2, 2022, pp.121-125.

[5] *Y. Nikitjuk, A. Serdyukov.* Determination of the Parameters of Controlled Laser Thermal Cleavage of Crystalline Silicon Using Regression and Neural Network Models. Crystallogr. Rep. 68, 2023, pp.1199-1204. https://doi.org/10.1134/S106377452360067

[6] N. *Zhao, H. Zhang, J. Lu, M. Tang, H. Zhang,* “Photoelasticity-based stress field analysis of glass under 1064 nm laser irradiation”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 181, 2024, 108367.

[7] *Ю.В. Никитюк, Л. Н. Марченко, А. Ф. Васильев, Ю.В. Бруттан.*, “Разработка нейросетевых моделей для прогнозирования параметров управляемого лазерного раскалывания кристаллического кварца”. Проблемы взаимодействия излучения с веществом: VI Международная научная конференция, посвящ. акад. Б. В. Бокутю, 2025, С. 220-225

[8] *С. Д. Штовба*. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва, Горячая линия, 2007, 284с.

Распознавание режимов формирования трещины при лазерном термораскалывании с использованием сверточных нейронных сетей

Ю. В. Никитюк, В. А. Прохоренко
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь,
Nikitjuk@gsu.by

***Аннотация**. В данной работе рассматривается задача прогнозирования поведения трещины при лазерном термораскалывании силикатного стекла — важного материала, используемого в производстве компонентов микроэлектроники и оптики. Учитывая высокие требования к качеству кромки и необходимости раннего выявления отклонений, предложено использование методов компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматизации контроля. Основой предложенного подхода является сверточная нейронная сеть ResNet-50, адаптированная под задачу анализа видеоданных в реальном времени. Проведённая тонкая настройка последних слоёв сети позволила достичь высокой точности при классификации развития трещины. Результаты демонстрируют перспективность применения ResNet для задач контроля процессов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов.*

I. Введение

Лазерное термораскалывание стеклянных пластин широко применяется в микроэлектронике и оптике для получения ровных краёв и минимизации механических повреждений. Для автоматизации контроля качества раскола важно оперативно определять, развивается ли трещина в соответствии с заданными требованиями или возникают отклонения, приводящие к браку изделия [1]. Компьютерное зрение в сочетании с методами глубокого обучения открывает новые возможности для контроля процесса в режиме реального времени. Сверточные нейронные сети (CNN) доказали свою эффективность в задачах классификации изображений и могут быть использованы для анализа видео процесса раскола в режиме реального времени.

В работе предложен метод прогнозирования развития трещины в кварцевом стекле при лазерном термораскалывании на основе сверточной нейронной сети ResNet [2].

II. Описания процесса лазерной резки

Процесс лазерного термораскалывания стекла заключается в локализованном термическом воздействии лазерного пучка, перемещающегося по верхней поверхности заготовки, в результате чего в объеме материала формируется направленное распределение температур, приводящее к возникновению растягивающих напряжений, инициирующих и направляющих развитие трещины. Такой термоуправляемый режим раскола обеспечивает высокую точность и качество разделения.

Поляризованный свет, проходя через силикатное стекло и фиксируясь видеокамерой с анализатором, позволяет посредством анализа его параметров в зоне обработки достоверно диагностировать наличие или отсутствие устойчивого формирования разделяющей микротрещины.

Процесс лазерного раскалывания фиксировался посредством статически установленной камеры в оптическом диапазоне с частотой кадров 60 fps и разрешением 1280×720 пикселей, размещённой над зоной обработки. Под пластиной находится поляризационная плёнка, позволяющая наблюдать зоны растяжения.

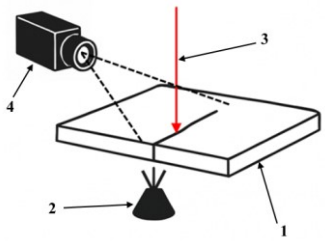


Рис.1. Схема осуществления процесса лазерной резки. 1 – стеклянная пластина, 2 – источник поляризованного света, 3 – лазерный луч, 4 – камера

III. Распознавание режимов формирования трещины

Набор данных был получен из 3 видеозаписей длиной 60с (60 fps), что обеспечивает получение 10800 изображений. Полученные изображения были вручную размечены экспертами на две категории:

контролируемая трещина – образование и развитие трещины вдоль заданной линии без отклонений;

аномальное развитие трещины – появление боковых ответвлений, непредсказуемых отколов или смещения зоны раскола, отсутствие развития трещины.

Для обучения нейронной сети сформированы выборки: 8000 кадров для обучения, 1400 – для валидации и 1400 – для тестирования.

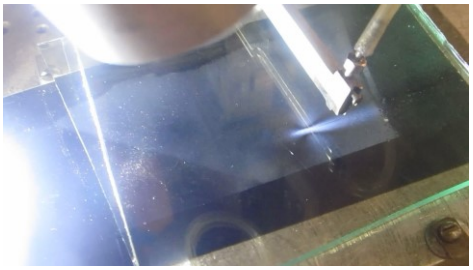


Рис.2. Пример полученного изображения, использованного для обучения нейросети

В качестве базовой сети использована предобученная на ImageNet [3] архитектура ResNet-50. Для сокращения времени обучения и повышения устойчивости модели применяется подход fine-tuning: только последние слои сети дообучаются на специфичных данных эксперимента, а исходные слои остаются замороженными.

Заморожены все сверточные блоки до последнего блока. Заменены полносвязные слои: добавлен слой Global Average Pooling и два полносвязных слоя с размерностью 512 и 128, ReLU-активацией и dropout = 0.4, затем выходной слой из двух нейронов с активацией softmax. Для поиска настраиваемых параметров использован оптимизатор Adam. Обучение проводилось с ранней остановкой (рис. 3).

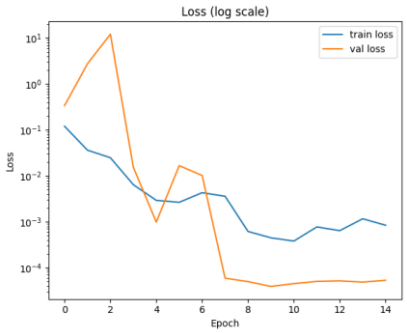


Рис.3. Визуализация значений функции потерь во время обучения

На тестовой выборке достигнуты показатели оценки качества модели, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Пример

Точность (Accuracy)	*Precision*	*Recall*	*F1-score*
92.3%	91.0%	93.5%	92.2%

IV. Заключение

Предложенный метод с использованием тонкой настройки последних слоёв ResNet-50 показал высокую эффективность для задачи прогнозирования развития трещины в процессе лазерного раскола стекла. Дальнейшие развитие работы может быть направлено на расширение набора данных, автоматическую аугментацию кадров и интеграцию модели в систему реального времени для управления процессом раскола.

Литература

[1] *Sereda A. A., Nikitiuk Yu. V., Serdiukov A. N., Shershnev E. B., Sokolov S. I.* Increasing the efficiency of laser-controlled thermal splitting of silicate glasses using the photoelasticity method. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhog*o, 2024, no. 2 (97), pp. 34–40. *https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-34-40*

[2] *He K., Zhang X., Ren S., Sun J.* Deep Residual Learning for Image Recognition. CVPR, 2016.

[3] *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E.* ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. NIPS, 2012.

Метод комбинирования машинного обучения и статистического анализа в задаче мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов

А. М. Астахов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия,
astahov_am@spbstu.ru

Аннотация. *Одним из факторов обеспечения автоматизации производств является мониторинг технического состояния оборудования для своевременного проведения обслуживания и ремонта. В работе рассмотрена задача мониторинга технического состояния магистрального насосного агрегата, направленная на уменьшение случаев внеплановых остановок насосных агрегатов. Для решения поставленной задачи рассмотрено использование распределения Вейбулла для анализа статистических данных и модели машинного обучения XGBoost для анализа информации с датчиков магистральных насосных агрегатов. Определен способ использования статистических данных для оценки технического состояния магистральных насосных агрегатов, определен способ обработки данных с датчиков для определения возможности дальнейшего эксплуатирования при прогнозируемом ближайшем отказе. Разработан метод комбинирования модели машинного обучения и статического анализа с приведенным решением поставленной задачи. Описан пример практического применения разработанного метода, представлено описание результатов работы.*

I. Введение

Основополагающим этапом повышения производительности предприятий за счет снижения времени простоя оборудования является прогнозирование технического состояния данного оборудования [1]. Прогноз представляет собой оценку времени до отказа и вероятности единичного или множественного отказа вследствие неисправностей (повреждений), имеющих место в настоящий момент или ожидаемых в будущем. Прогноз основывается на подтвержденных опытом знаниях о процессах развития неисправностей разного вида. Задача прогноза – дать пользователю возможность оценить остаточный ресурс машины с достаточной степенью достоверности [2].

Обратим внимание на то, как формируются графики технического обслуживания и ремонта (ТОР) для всех типов оборудования нефтеперекачивающих станций (НПС). Планирование технического обслуживания и ремонта магистральных насосных агрегатов (МНА) проводится по графикам планово-предупредительных работ (ППР) и фактическому состоянию оборудования по результатам диагностических контролей (система ТОР по фактическому техническому состоянию) [3].

В данном случае, при создании условий для формирования прогноза отказа МНА в связи с естественными процессами износа компонент насоса, возникает возможность формирования графиков проведения работ по обслуживанию и ремонту через оценку фактического технического состояния, снижая частоту применения планово-предупредительных работ. В результате метод прогнозирования технического состояния МНА позволит уменьшить случаи внеплановых остановок $\Omega(t)$ МНА, тем самым обеспечивая повышение общего уровня работоспособности всей НПС.

$$\Omega(t) = \left\{ \int_0^t \omega(\tau) d\tau \,\middle|\, \omega(\tau) \geq 0, \forall \tau \in [0, t] \right\} \rightarrow min, \quad (1)$$

где $\omega(\tau)$ – параметр потока отказов, производная среднего числа отказов на момент τ.

В результате применение метода прогнозирования технического состояния магистральных насосных агрегатов позволит заранее определять потенциальные отказы МНА, тем самым обеспечивая возможность осуществления вывода оборудования из рабочего состояния в

оптимальные периоды времени, снижая нагрузку на магистральный трубопровод, а также минимизируя энергетические затраты на запуск резервного оборудования.

II. Разработка метода

В рамках разрабатываемого метода предлагается использование распределения Вейбулла и модели машинного обучения XGBoost для обработки имеющихся статистических данных и информации с датчиков насосных агрегатов.

Применение распределения Вейбулла направлено на вычисление вероятности отказа каждой детали конструктивного узла МНА. Исходя из этого опишем, как будет проводиться прогнозирование технического состояния МНА на основе оценки состояния конструктивных узлов.

Пусть N_i – количество конструктивных узлов МНА, сам магистральный насосный агрегат обозначим как M. Каждый конструктивный узел МНА состоит из j-го набора деталей

$$N_i = \{n_1, n_2, \dots, n_j\}, \tag{2}$$

где n – деталь конструктивного узла МНА.

Обозначим вероятность отказа i-го конструктивного узла как Q_N. Данная вероятность в свою очередь определяется как максимальная вероятность отказа любой детали, входящей в состав узла

$$Q_N = \max_{n \in \{1,\dots,j\}} Q_n\,, \tag{3}$$

где Q_n – вероятность отказа детали конструктивного узла МНА.

Вероятность работоспособности конструктивного узла МНА формируется исходя из вероятности отказа

$$P_N = 1 - Q_N \tag{4}$$

Вероятность отказа всего МНА будет определяться через максимальную вероятность отказа любого из узлов

$$Q_M = \max_{N \in \{1,\dots,i\}} Q_N \tag{4}$$

Вероятность работоспособности МНА можно выразить следующим образом:

$$P_M = \min_{N \in \{1,\dots,i\}} P_N \tag{5}$$

В результате вероятность отказа всего МНА будет основываться на наименьшей вероятности работоспособности любой детали из любого конструктивного узла насоса.

В случае использования модели машинного обучения XGBoost будет проводиться прогнозирование технического состояния МНА в виде бинарного результирующего параметра, определяющего отказ МНА в ограниченный период времени T, представленное в формуле (6).

$$Q_M = \begin{cases} 1, \text{если отказ МНА произойдет в течение периода } T \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \tag{6}$$

Перейдем к рассмотрению использования полученных значений в рамках анализа статических данных и информации с датчиков магистрального насосного агрегата.

Результатом работы модели XGBoost является идентификация по данным, получаемых с датчиков X, предстоящего отказа МНА. В результате, если рассматривать случай, если при разметке датасета использовались несколько критериев $(T_1, T_2, \dots, T_n)$, которые определяют временные участки предстоящего отказа (как было описано ранее, прогноз отказа в течение месяца и недели), то в данной задаче проверяется значение того критерия T^*, который ближе всего относится к временному промежутку выполняемого плана прокачки $t_{\text{план}}$

$$T^* = \operatorname*{argmin}_{T_i} T_i - t_{\text{план}} \tag{7}$$

Так как значение бинарно ($Y = 0$ при нормальном функционировании МНА без отказа по рассматриваемому временному критерию и $Y = 1$ при будущем отказе), прогноз модели XGBoost формируется следующим образом

$$Y = f(X, T^*) \tag{8}$$

В случае, если модель XGBoost прогнозирует будущий отказ ($Y = 1$), то данный МНА не может быть использован для выполнения маршрутного поручения. Это можно выразить через бинарное решение U:

$$U = 1 - Y, \tag{9}$$

где $U = 0$ определяет невозможность использования МНА, а $U = 1$ позволяет использовать для выполнения маршрутного поручения.

Данное ограничение, вводимое моделью XGBoost, является первичным и позволяет убрать из рассмотрения те МНА, которые потребуют проведения внепланового ремонта в ближайшем времени. Дальнейшее решение задачи связано с использование результирующих значений распределения Вейбулла для анализа состояния деталей МНА. Рассмотрим процесс оценки.

Для каждого МНА проводится проверка состояний конструктивных узлов на основе распределения Вейбулла, а далее, как было описано ранее, берется минимальное значение работоспособности конструктивного узла МНА как значение общей работоспособности насосного агрегата. Данная операция выполняется для всего насосного парка НПС.

$$P_i = \min_j P_{i,j}\,, \forall i \in M, \tag{10}$$

где P_i – общая работоспособность i-го МНА, $P_{i,j}$ – работоспособность j-го конструктивного узла i-го МНА, M – множество МНА в парке НПС.

На основе проведенного анализа данных проводится формирование информации о техническом состояния магистрального насосного агрегата.

III. Заключение

В результате в работе описана задача, направленная на снижение случаев внеплановых остановок магистральных насосных агрегатов, решением которой является создание метода мониторинга технического состояния насосных агрегатов. Представлена разработка метода комбинирования машинного обучения и статистического анализа в задаче мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов, описан способ использования полученных данных.

Литература

[1] *Шумак К.Д.* Математические методы прогнозирования отказов медицинского оборудования // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 1. С. 99-101.

[2] ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016. Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство.

[3] *Земенко Ю.Д., Подорожников С.Ю., Голик В.В. и др.* Эксплуатация механо-технологического оборудования. Курс лекций. Тюмень: ТИУ, 2019. 257 с.

Software application for identifying micro-hydroelectric power plant locations, taking into account the landscape and climatic characteristics of the region

P. Yu. Buchatskiy, D. A. Atagyan, S. V. Onishchenko, S. V. Teploukhov
Adyghe State University, Maykop, Russia,
buch@adygnet.ru, a.atagyan@adygnet.ru, osv@adygnet.ru, tepl_sv@adygnet.ru

Abstract. *With the growing need for sustainable and decentralized energy sources, micro-hydroelectric power plants (MHPPs) are getting a lot of attention because they can efficiently turn the energy from small rivers into electricity. This paper describes a modular software application designed to identify locations for MPPs on mountain rivers using geospatial analysis and machine learning methods. The solution integrates the processing of digital elevation models (DEM), hydrographic data, and climatic parameters to assess topographic, hydrological, and infrastructure characteristics. The implemented algorithm allows identifying areas with maximum energy potential, taking into account elevation differences, seasonal water availability, and accessibility for maintenance. Testing on data from the Caucasus region showed high localization accuracy with a power estimation error of ±12%. The results can be used for preliminary assessment of the feasibility of installing small hydropower plants, power system planning, and optimization of operating costs, which contributes to the development of renewable energy in remote and hard-to-reach areas.*

I. Introduction

Current trends in energy development are characterized by growing demand for environmentally friendly and decentralized energy sources [1], driven by the need to reduce anthropogenic impact on the environment and ensure energy security in remote regions. In this context, the use of the potential of small rivers and streams for electricity generation through micro-hydroelectric power plants (MHPPs) [2] is becoming particularly relevant. Such installations have a number of advantages, including minimal interference with ecosystems, low operating costs, and the ability to integrate into local power systems.

However, the effective implementation of any type of renewable energy source, including small hydropower plants, requires an assessment of their potential [3] and precise determination of their location, which is a complex task due to the need to take into account a multitude of factors: topographical features of the terrain, hydrological characteristics of watercourses, seasonal water dynamics, and infrastructure accessibility. Traditional assessment methods require significant resources and field research [4], which is why automated geospatial analysis tools that allow for preliminary identification of promising sites based on digital terrain model data and vector hydrographic data are particularly relevant. To address this problem, a software application has been developed to automatically determine the optimal locations for small hydropower plants on mountain rivers.

II. Materials and methods

The application is based on modern methods of geospatial analysis [5] and machine learning, which allows:

- automatically process digital elevation models (DEM) and hydrographic data;
- assess the energy potential of river sections, taking into account elevation differences, water flow, and other parameters;
- integrate data on the proximity of settlements and infrastructure to ensure ease of operation;
- visualize results in the form of interactive maps and reports.

The use of the application significantly reduces the time required for pre-project analysis and improves the accuracy of estimates, making it a valuable tool for planning small hydropower systems. The article describes the software implementation and test results of the application for determining the location of MHPPs using the example of mountain rivers in the Caucasus region, consisting of four main modules:

1. A geospatial analysis module that allows preliminary processing of topographic data into a digital model of the hydrographic network with key parameters (gradients, elevation differences, channel morphology), which are the main parameters for any subsequent calculation. as a result of which digital elevation models (DEM) with a resolution of 10-30 meters were processed, an algorithm for automatic riverbed discretization with an adaptive step (0.1-1% of the watercourse length) was developed, and the hydraulic slope [6] was calculated using the formula:

$$I = \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

where ΔH is the difference in elevation between points, L is the distance along the stream channel

2. Hydrodynamic modeling module, providing a transition from static geometry to dynamic flow parameters (flow rates, seasonal variability), which allows for a realistic assessment of the generating potential for each section of the river:

$$P = \eta \times \rho \times g \times Q \times H \quad (2)$$

where η is efficiency (0.6-0.8), Q is water flow rate, and H is water head.

3. The placement optimization module, which solves the main practical task – where exactly to place MHPPs. The weighted criteria system, for example:

$$score = 0.4 \times slope + 0.3 \times flow + 0.3 \times \frac{1}{distance} \quad (3)$$

takes into account not only energy efficiency (water head, flow rate), but also economic logistics (proximity to consumers/grids).

4. A visualization module that allows complex data arrays to be interpreted into intuitive maps (fig. 1), graphs, and 3D models.

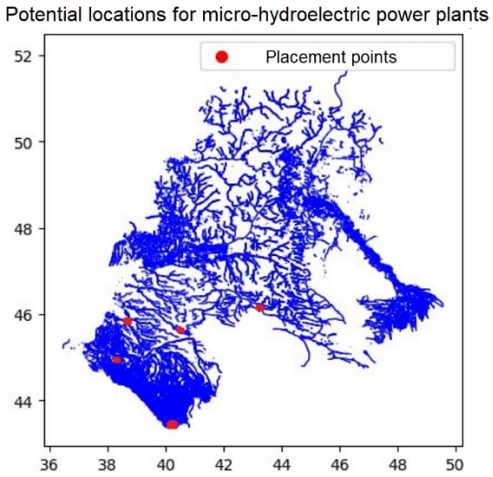


Fig.1. Visualization of analysis results: highlighting areas with maximum energy potential and priority points for MHPPs

Testing of the application on 15 mountain rivers in the North Caucasus demonstrated its effectiveness as a strategic tool for the development of local energy, allowing for a reduction in the threshold for entry into the renewable energy sector and the creation of a list of promising sites for micro-HPPs that can be integrated into distributed networks.

III. Conclusion

This paper describes a software application developed for the automated identification of potential points for micro-hydroelectric power plants based on geospatial analysis of digital elevation models and vector data from the hydrographic network. The solution provides extraction of the longitudinal profile of the river, calculation of local slopes, and identification of promising sites from a technical point of view, which reduces the cost of pre-project studies and increases the validity of site selection for construction. The integration of analytical procedures with spatial analysis methods makes the development applicable for territorial planning, rapid assessment of energy potential, and decision support in the field of distributed hydropower. In the future, it will be possible to expand the functionality by including water flow calculations, filtering sites according to accessibility and ecosystem

sustainability criteria, and integrating with digital platforms for renewable energy development planning at the regional level, which will enable the effective construction of distributed energy systems based on renewable energy.

References

[1] *Onishchenko S., Mamiy A., Yurkaev K.* Development of Hardware Module for Collecting Parameters of Microhydroelectric Power Plant Operation in Mountainous Conditions, 2024, pp. 245-249. 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553856.

[2] *Yuksel, I.* Investment cost analysis in small hydropower plants in terms of efficiency and a case study in the Euphrates and Tigris basins. Discov Energy 4, 19 (2024). https://doi.org/10.1007/s43937-024-00047-3

[3] *P. Y. Buchatskiy, S. V. Onishchenko, S. V. Teploukhov and K. A. Kuzmin*, "Modeling of Wind Generator in the Power Supply System of an Individual Consumer Using SimInTech," 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCT62929.2024.10874937.

[4] *Jung, S.; Bae, Y.; Kim, J.; Joo, H.; Kim, H.S.; Jung, J.* Analysis of Small Hydropower Generation Potential: (1) Estimation of the Potential in Ungaged Basins. Energies 2021, 14, 2977. https://doi.org/10.3390/en14112977

[5] *Bedanokov M. K., Buchatskiy P. Y., Teploukhov S. V., Onishchenko S. V.* The Use of Climatic and Geospatial Data in Assessing the Potential of “Green Energy” and Designing Energy Systems with Renewable Energy Sources in the Republic of Adygea // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. no. 2. pp. 1-7. DOI: https://doi.org/10.2205/2025ES000977

[6] *Kombo OH, Kumaran S, Sheikh YH, Bovim A, Jayavel K.* Long-Term Groundwater Level Prediction Model Based on Hybrid KNN-RF Technique. Hydrology. 2020; 7(3):59. https://doi.org/10.3390/hydrology7030059

Синтез управления нелинейным динамическим объектом с обратной связью с предысторией

К. Р. Айда-заде[1,2], В. А. Гашимов[1]
[1]Институт Систем Управления, г. Баку, Азербайджан,
[2]Азербайджанский архитектурно-строительный университет, г. Баку, Азербайджан,
kamil_aydazade@rambler.ru, vugarhashiov@gmail.com

Аннотация. *Предлагается подход к оптимальному синтезу управления динамическими системами, описываемыми нелинейными автономными дифференциальными уравнениями с обыкновенными производными. Обратная связь осуществляется по состоянию, причем наблюдаемыми (замеряемыми) могут быть не все компоненты состояния. Для формирования текущего значения управления предлагается использовать линейную зависимость от результатов проведенных замеров как в текущий момент времени, так и замеров в предыдущие времена. Постоянные коэффициенты, участвующие в этих зависимостях, являются параметрами обратной связи. Относительно этих параметров получены формулы для компонентов градиента целевого функционала. Используя методы оптимизации первого порядка поведены компьютерные эксперименты на тестовых задачах.*

I. Введение

В работе предложен подход к оптимальному синтезу управления динамическими объектами, описываемыми автономными нелинейными дифференциальными уравнениями с обыкновенными производными.

В отличие от задач оптимального программного управления нелинейными системами [1-3], исследованию задач управления с обратной связью посвящено сравнительно мало работ [4-6]. В основном в известных работах предлагается использовать метод линеаризации нелинейных систем в окрестности текущего состояния, а далее применять хорошо разработанные методы синтеза линейных систем. Такой подход возможно использовать в системах автоматического управления лишь в малой окрестности устойчивого состояния, а следовательно, системе управления будет требоваться частое проведение перерегулирования [4,6].

Специфической особенностью предлагаемого в данной работе подхода к построению систем управления с обратной связью заключается: 1) в возможной нелинейности системы дифференциальных уравнений; 2) в использовании результатов замера не всех компонент вектора состояния, а только его части; 3) в использовании для формирования значения управления результатов замеров как в текущий, так и в предыдущие моменты времени.

Для формирования значения управления используется линейная зависимость от замеренных состояний. Постоянные коэффициенты, участвующие в этих зависимостях, являющиеся параметрами обратной связи, определяются из минимизации целевого функционала исходной задачи. Для этого получены формулы градиента целевого функционала в пространстве параметров обратной связи. Они позволяют применять для определения оптимальных значений параметров обратной связи численные методы оптимизации первого порядка [2,3,8].

Приводятся результаты компьютерных экспериментов, полученные при решении тестовых задач синтеза оптимального управления с учетом возможных помех при проведении замеров состояния.

II. Постановка задачи

Рассматривается динамический объект, описываемый следующей нелинейной системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(t) = f(x(t),u(t);\theta), t \in \left(t_0,t_f\right], \quad (1)$$

$$x(t_0) = b \in \mathcal{B} \subset \mathbb{R}^n \quad (2)$$

Здесь: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор фазового состояния; $u(t) \in U \subset \mathbb{R}^r$ – вектор управления, принимающий значения в замкнутой области U; $\theta \in \Theta \subset \mathbb{R}^p$ – вектор неконтролируемых

параметров, принимающий значения в заданной области Θ; $\mathcal{B} \subset \mathbb{R}^n$ множество возможных значений начального состояния. На множествах Θ, $\mathcal{B}$ в случае их непрерывности заданы неотрицательные функции плотности распределения $\rho_\Theta(\theta) \geq 0$, $\rho_\mathcal{B}(b) \geq 0$:

$$\int_\Theta \rho_\Theta(\theta)d\theta = 1, \quad \int_\mathcal{B} \rho_\mathcal{B}(b)db = 1$$

В случае дискретных множеств Θ, $\mathcal{B}$ задаются вероятности $P(\theta \in \Theta)$, $P(b \in \mathcal{B})$.

Управляющие воздействия должны удовлетворять следующим условиям:

$$\underline{u_i} \leq u_i(t) \leq \overline{u_i}, \quad i = 1,2,\dots,r, \quad t \in [t_0, t_f], \tag{3}$$

$$\underline{M_i^\delta} \leq u_i(t) - u_i(t-\delta) \leq \overline{M_i^\delta}, t \in [t_0 + \delta, t_f],$$

где $\delta > 0$, $\underline{u_i}$, $\overline{u_i}$, $\underline{M_i^\delta}$, $\overline{M_i^\delta}$, $i = 1,2,\dots,r$ – заданы.

В исходной задаче требуется определить кусочно-непрерывное управление $u = u(t)$, удовлетворяющее условиям (3), и совместно с решением задачи Коши (1), (2) минимизирующие функционал

$$J(u) = \int_\mathcal{B} \int_\Theta I(u;\theta,b)\rho_\Theta(\theta)\,\rho_\mathcal{B}(b)\,d\theta db, \tag{5}$$

$$I(u;\theta,b) = \int_{t_0}^{t_f} f_0\big(x(t;u,\theta,b),u(t)\big)dt + \mathcal{F}\left(x\big(t_f;u,\theta,b\big)\right) \tag{6}$$

Здесь $x(t;u,\theta,b)$ есть решение задачи (1), (2) при заданных допустимых управлении $u(t)$, начальном условии b и значении вектора внешних параметров θ.

Для формирования текущего значения управления $u(t)$ используем результаты замеров первых m компонент вектора состояния, т.е. $\hat{x}(t) = \big(x_1(t),x_2(t),\dots,x_m(t)\big)^*$ (оставшиеся $(n-m)$ компонент $\check{x}(t) = \big(x_{m+1}(t),x_{m+2}(t),\dots,x_n(t)\big)^*$ являются не наблюдаемыми):

$$u(t) = u(t;k) = \sum_{i=0}^{l-1} k_i\,\hat{x}(t - i\Delta) + k_l, \quad t \in [t_0, t_f], \tag{7}$$

где, k_l – r-мерный вектор, k_i, $i = 0,1,\dots,l-1$, матрица параметров обратной связи размера $(r \times m)$, l – заданное число наблюдений, используемых для формирования управления (длина памяти обратной связи). Δ – заданная малая величина, выбор которой зависит от динамических свойств самого объекта. В целом $k = [(k_0,k_1,\dots,k_{l-1}),k_l] \in \mathbb{R}^{(lm+1)r}$ определяет параметр обратной связи, который требуется оптимизировать из условий:

$$\dot{x}(t) = f(x(t),u(t;k);\theta), t \in (t_0,t_f], \tag{8}$$

$$J(k) = \int_\mathcal{B} \int_\Theta I(k;\theta,\varphi)\,\rho_\Theta(\theta)\rho_\mathcal{B}(b)\,d\theta db, \tag{9}$$

$$(k;\theta,b) = \int_{t_0}^{t_f} f_0\big(x(t;k,\theta,b),u(t;k)\big)dt + \mathcal{F}\left(x\big(t_f;k,\theta,b\big)\right) \tag{10}$$

Здесь $x(t;k,\theta,b)$ решение задачи (9) при заданных параметрах обратной связи k, начальном условии b, векторе параметров внешних воздействий θ из Θ.

В работе получены формулы для компонент градиента

$$\mathrm{grad}_k J(k) = \left(\frac{\partial J(k)}{\partial k_0}, \frac{\partial J(k)}{\partial k_1}, \dots, \frac{\partial J(k)}{\partial k_l}\right)$$

Для формирования ограничений на параметры k использованы ограничения (3), (4), а также предположение о том, что известен диапазон возможных значений фазовых переменных:

$$\underline{x_i} \leq x_i(t) \leq \overline{x_i}, \quad i = 1,2,\dots,n, \quad t \in [t_0,t_f],$$

при допустимых значениях управления $u(t)$ и начальном условии b, и внешних воздействий θ.

В работе приводятся результаты компьютерных экспериментов, полученные при решении задачи оптимального синтеза (8)–(10) на примере тестовых данных, в том числе с учетом возможных погрешностей в проводимых замерах компонент вектора состояния.

III. Заключение

В работе предложен подход к синтезу управления нелинейной автономной системой дифференциальных уравнений. Предполагается, что не все компоненты вектора состояния возможно замерить. Это компенсируется использованием результатов замеров в предыдущие моменты времени.

Вместо предлагаемых в работе формул для зависимости значения управления от замеренных значений наблюдаемых компонент состояния можно использовать другие варианты зависимостей, в том числе нелинейные, интегральные и т.п. При этом, в целом методика исследований, приведенная в работе, существенно не изменится.

Литература

[1] *Егоров А.И.* Основы теории управления. М: Физматлит. 2004.

[2] *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.* Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: ЛЕНАНД, 2014.

[3] *Васильев Ф.П.* Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс, 2002.

[4] *Ли Э.Б., Маркус Л.* Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972.

[5] *Емельянов С.В., Коровин С.К.* Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. М.: Наука, Физматлит, 1997.

[6] *Брайсон А., Хо Ю-ши*. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.

[7] *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б.* Математическая теория автоматического управления. М.: ЛЕНАНД, 2019.

[8] *Aida-zade K.R., Guliyev S.Z.* “Synthesis of Zonal Control of Nonlinear Dynamic Objects Taking into Account their History and Current State”, *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-3.

Zonal feedback control of the heat conduction process by means of lumped sources

K. R. Aidazade[1,2], S. Z. Guliyev[1,3]
[1]Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan,
[2]Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan,
[3]Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan,
kamil_aydazade@rambler.ru, azcopal@gmail.com

Abstract. *This work presents a numerical approach to solving feedback control problems for systems governed by distributed parameter equations, using the rod heating process as a case study. The powers of the heat sources serve as the control input. The approach implements feedback using the system's phase state measured at selected spatial points, and introduces the concept of zonal control, wherein the system's observable state space is partitioned into zones, each associated with a constant control value. Unlike conventional feedback laws – wherein control values continuously depend on the current state – the zonal strategy updates control inputs only when the system transitions between predefined regions of the state space. This reduces actuator wear and enhances robustness with respect to uncertainties present in the initial state and the surrounding medium's temperature. The resulting feedback control problem is reformulated as a finite-dimensional parametric optimization problem. Gradient-based methods are employed for optimization, with explicit expressions derived for the gradient of the objective functional. Numerical experiments conducted on test problems demonstrate the efficacy of the approach in achieving desired terminal temperature profiles while maintaining computational efficiency and robustness.*

I. Introduction

Advances in industrial automation and computational technologies have significantly expanded the applicability of feedback control systems, particularly those based on lumped parameter models. Modern instrumentation enables real-time data acquisition and control, enhancing efficiency across engineering domains [1, 2]. Consequently, feedback control remains a subject of both theoretical and practical relevance. In parallel, growing interest has focused on extending feedback strategies to systems governed by distributed parameters, such as heat transfer, fluid flow, structural dynamics, etc. While foundational works have established the theoretical basis, feedback design for such systems remains challenging due to their complexity and the lack of unified methodologies [3 – 6].

This study presents a numerical solution strategy for feedback control synthesis in distributed systems, based on a special class of control laws termed "zonal controls". Central to the proposed approach is the concept of "zonality", which entails that control values remain fixed within designated subsets or regions of the system's observable state space. Unlike conventional control synthesis approaches where control values vary continuously with the system state, the zonal control approach permits changes in control parameters only when the phase state transitions between such regions. The approach is particularly suitable when feedback is available only at discrete points, and where measurements involve uncertainty or high cost [7]. A defining feature of the zonal approach is the discretization of the state space into subsets – or zones – where the control values are constant. This structure enhances the robustness of the control system and supports high-accuracy control synthesis, while also improving system durability by reducing the frequency of control signal changes [8]. Applications of the zonality principle have proven effective in inverse and optimization problems, such as the identification of pipeline resistance coefficients under nonstationary flow [9], or in control and parameter estimation for lumped systems [10 – 12].

We conducted several computational experiments on test problems, taking into account potential measurement disturbances in the observed system state.

II. Problem Statement

We consider the feedback control of a one-dimensional heat conduction process along a rod of length 1 over time $(0, T]$, described by the PDE:

$$u_t(x,t) = a u_{xx}(x,t) + \mu_0[\theta - u(x,t)] + \sum_{i=1}^{N} v_i(t)\delta(x - \overline{x}_i), \quad (x,t) \in \Omega = (0,1) \times (0,T] \tag{1}$$

with boundary and initial conditions:

$$u_x(0,t) = \mu_1[\theta - u(0,t)], \qquad u_x(1,t) = \mu_1[u(1,t) - \theta], \qquad t \in [0,T], \tag{2}$$

$$u(x,0) = \varphi_0(x,\gamma), \qquad x \in [0,1] \tag{3}$$

Here, $\delta(\cdot)$ is the Dirac delta function modeling point heat sources at positions $\overline{x}_i \in (0,1)$, and $v_i(t)$ are the corresponding control inputs; the parameters a, μ_0, and μ_1 denote the thermal diffusivity and heat transfer coefficients. Note that the initial temperature of the rod, $u(x,0)$, is not known exactly, but is defined by a known parametrically given function $\varphi_0(x,\gamma)$, which depends on a time-independent parameter vector $\gamma \in \mathbb{R}^r$, the exact values of which are unspecified. However, the set Γ of possible values of the parameter vector γ is known, along with the corresponding probability density function $\rho_\Gamma(\gamma) \geq 0$ such that $\int_\Gamma \rho_\Gamma(\gamma)\mathbb{d}\gamma = 1$. As a result, the process is modeled by a system without specified initial conditions [13]. Moreover, the ambient temperature θ is also not known exactly; however, the set $\Theta \subset \mathbb{R}$ of its possible values is given, along with the corresponding probability density function $\rho_\Theta(\theta) \geq 0$ such that $\int_\Theta \rho_\Theta(\theta)\mathbb{d}\theta = 1$.

The system's state is observed at M fixed points $\hat{x}_j \in (0,1)$, $j = 1,2,\dots,M$, yielding temperature measurements:

$$\overline{\mathrm{u}}(t) = \big(\overline{u}_1(t), \overline{u}_2(t), \dots, \overline{u}_M(t)\big),\ \overline{u}_j(t) = u\big(\hat{x}_j, t\big),$$

which are collected at discrete time instances $\tau_k \in [0,T]$, $k = 0,1,2,\dots,L$, where $\tau_0 = 0$ and $\tau_L = T$. The goal is to synthesize a feedback controller that uses these temperature measurements to regulate the control inputs $v_i(t)$, ensuring that the terminal state $u(x,T)$ matches a prescribed temperature profile $\tilde{u}(x)$ as closely as possible. To satisfy physical and technological constraints, the control inputs have to be bounded:

$$v_i(t) \in V_i = \big[v_i^{\min}, v_i^{\max}\big],\ i = 1,2,\dots,N,\ t \in [0,T],$$

where $v_i^{\min}$ and $v_i^{\max}$ represent the minimum and maximum values, respectively, the control can assume, and the overall admissible control space is defined as $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_N$. The feedback control law is assumed to be a function of the observed temperature values:

$$v_i(t) = v_i\big(\overline{\mathrm{u}}(t)\big) \in V_i, \qquad i = 1,2,\dots,N, \qquad t \in [0,T] \tag{4}$$

The performance of the system is assessed by an objective functional that averages the deviation of the final state from the desired temperature profile over the uncertainty in the initial condition and in the values of the ambient temperature:

$$\begin{gathered}\mathcal{F}\big(\mathrm{v}(t)\big) = \int_\Theta \int_\Gamma \Phi(u,T;v,\theta,\gamma)\,\rho_\Gamma(\gamma)\,\rho_\Theta(\theta)\,\mathbb{d}\gamma\,\mathbb{d}\theta + \varepsilon \sum_{i=1}^{N} \|v_i(t)\|^2_{L_2[0,T]}, \\ \Phi(u,T;v,\theta,\gamma) = \int_0^1 \omega(x)[u(x,T;v,\theta,\gamma) - \tilde{u}(x)]^2\mathbb{d}x\end{gathered} \tag{5}$$

where $\omega(x)$ is a weight function; ε the regularization parameter; $\tilde{u}(x)$ the desired terminal temperature profile. The goal is to determine control laws $v_i\big(\overline{\mathrm{u}}(t)\big)$, $i = 1,2,\dots,N$, that minimize $\mathcal{F}(\cdot)$ under the given constraints.

III. Zonal Feedback Control Strategy

In the feedback control strategy under consideration, control inputs depend on the system state observed at specific spatial points. Unlike traditional feedback, which adjusts control values continuously**,** zonal control assigns constant control values within predefined regions – or zones – of the measurement space. Assume that the temperature at the observation points remains within a known range $[u_{\min}, u_{\max}]$. We partition this interval into K subintervals by the points ξ_s, $s = 0,1,2,\dots,K$, where $\xi_0 = u_{\min}$ and $\xi_K = u_{\max}$. Let the measured temperature vector at time τ_k be $\overline{\mathrm{u}}(\tau_k) = \big(\overline{u}_1(\tau_k), \overline{u}_2(\tau_k), \dots, \overline{u}_M(\tau_k)\big)$, where $\overline{u}_j(\tau_k) = u\big(\hat{x}_j, \tau_k\big)$, $j = 1,2,\dots,M$. We define a collection of M-dimensional hyperrectangular regions, or "zones", in the state space:

$$Z_{j_1,j_2,\dots,j_M} = \big\{\overline{\mathrm{u}}(\tau_k) \in \mathbb{R}^M \mid\ \xi_{j_s-1} \leq \overline{u}_s(\tau_k) \leq \xi_{j_s}, s = 1,2,\dots,M\big\} \tag{6}$$

for all combinations of indices $j_s \in \{1,2,\dots,K\}$. The total number of such zones is K^M. Each zone is assigned a fixed control vector value, meaning that the control function is piecewise-constant in the state space. Let $\mathrm{v}^{(j_1,j_2,\dots,j_M)}$ denote the set of control values assigned to each zone. Then, the feedback law is defined as:

$$v_i(t) = v_i^{(j_1,j_2,\dots,j_M)} = \text{const}, \qquad \text{for } t \in [\tau_k, \tau_{k+1}), \qquad \text{if } \bar{u}(\tau_k) \in Z_{j_1,j_2,\dots,j_M} \quad (7)$$
$$where\ k = 0,1,2,\dots,L-1, and\ i = 1,2,\dots,N$$

Control updates occur only when the system transitions between zones, reducing switching frequency and enhancing robustness. This strategy transforms the infinite-dimensional feedback problem into a finite-dimensional optimization problem. To solve this finite-dimensional optimization problem efficiently, we apply a gradient-based method, such as the (conjugate) gradient projection method [14], due to the simple structure of the set of admissible control values V. This requires computing gradients of $\mathcal{F}(\mathrm{v})$, derived in the work via the variation method by evaluating the functional's sensitivity to perturbations in control values.

To evaluate the effectiveness of the proposed zonal feedback control strategy, we conducted a series of computational experiments on several test problems. The experiments aim to assess both the accuracy of the control in achieving the desired terminal temperature distribution and the efficiency of the optimization procedure in determining the zonal control values. In the test problems, we considered various scenarios involving different numbers of observation points (sensors), zones per sensor, and heat sources. For each configuration, the temperature domain observed at sensor locations was divided into a finite number of intervals, forming hyperrectangular zones in the phase space. A piecewise-constant control function was associated with each zone, and its value was optimized using a gradient-based iterative method.

References

[1] *Levine W.S.* The Control Systems Handbook. 2nd edn. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2011.

[2] *Franklin G.F., Powell J.D., Emami-Naeini A.* Feedback Control of Dynamic Systems. 8th edn. Harlow, UK: Pearson, 2019.

[3] *Bryson A.E., Yu-Chi Ho.* Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control. 1st edn. New York: CRC Press, 1975.

[4] *Lions J.L.* Optimal Control of Systems Governed by Partial Differential Equations. Berlin: Springer-Verlag, 1971.

[5] *Lurie K.A*. Applied Optimal Control Theory of Distributed Systems. New York: Springer-Verlag, 1993.

[6] *Fursikov A.V.* Optimal Control of Distributed Systems: Theory and Applications. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 1999.

[7] *Ackermann J.* Robust Control: Systems with Uncertain Physical Parameters. New York: Springer-Verlag, 1993.

[8] *Sanchez-Pena R., Sznaier M.* Robust Systems: Theory and Applications. New York: Wiley, 1998.

[9] *Aida-zade K.R., Guliev S.Z.* "Hydraulic Resistance Coefficient Identification in Pipelines," Automation and Remote Control, 2016, vol. 77(7), pp. 1225–1239.

[10] *Aida-Zade K.R., Guliev S.Z.* "Numerical Solution of Nonlinear Inverse Coefficient Problems for Ordinary Differential Equations," Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2011, vol. 51(5), pp. 803–815.

[11] *Aida-Zade K.R., Guliev S.Z.* "On Numerical Solution of One Class of Inverse Problems for Discontinuous Dynamic Systems," Automation and Remote Control, 2012, vol. 73(5), pp. 786–796.

[12] *Aida-zade K.R., Guliyev S.Z.* "Synthesis of Zonal Control of Nonlinear Dynamic Objects Taking into Account their History and Current State", 2024, 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp.1-3.

[13] *Tikhonov A.N., Samarskii A.A*. Equations of Mathematical Physics. New York: Dover Publications, 2011.

[14] *Calamai P.H., More J.J.* "Projected Gradient Methods for Linearly Constrained Problems," Mathematical Programming, 1986, vol. 39, pp. 93-116.

Формирование виртуального пространства для обучения лётчиков решению навигационных задач при полётах на авиационном тренажёре

В. Р. Роганов[1], М. Ю. Михеев[1], Б. С. Долговесов[2], А. Е. Савочкин[1], И. С. Собанчин[3]

[1]Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия,
[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия,

[3]АНОО «Президентский лицей «Сириус», г. Сочи, Россия,
vladimir_roganov@mail.ru, bsd@mail.ru

***Аннотация**. Появление видеокарт Geforce для современных персональных компьютеров упростило разработку имитаторов синтезирующих во время полёта на авиационном тренажёре 3D-модели реперных объектов размещённых на подстилающей поверхности 3D-модели района полётов заданного Заказчиком. Ранее для этих целей использовались дорогие специализированные мультипроцессорные системы компьютерного синтеза производство которых у нас в стране и за рубежом было доступно только крупным объединеньем. С их помощью решены задачи обучения визуальной посадки летательного аппарата на ВПП и обучение процессу дозаправки летательного аппарата в воздухе. Это позволило определить требования к примитивам из которых набираются 3D-модели синтезируемые в режиме реального времени на подключённом экране как видеоряд из 2D-проекций 3D-моделей, попавших в камеру наблюдения программно-технической системы. В настоящее время появилась возможность систематизировать разработанные управляющие и визуальные примитивы, учитывая что необходимо синтезировать 3D-модели в зрительном диапазоне электромагнитных волн, в ИК-диапазоне (монохромный окрас) и в ИК-диапазоне (мультиспектральный окрас).*

I. Введение

Имитатор визуальной обстановки (ИВО) синтезирует визуально наблюдаемые *3D*-модели реперных объектов [1], объединение которых создаёт у лётчика во время полёта на авиационном тренажёре (АТ) ощущение, что он летит на реальном летательном аппарате (ЛА) и может рассматривая эти модели решать задачи пилотирования и самолетовождения. Этот эффект достигается комплексом оптико-программно-технических средств [2]. Каждая систем входящая в такой комплекс решает свою задачу:

- эргатический *3D*-индикатор переносит с плоского экрана покадровые изображения *2D*-проекций *3D*-моделей, попавших в пирамиду видимости ИВО, при этом вершина этой пирамиды видимости находится на месте расположения глаз лётчика в кабине реального ЛА, оптическая ось совпадает с продольной осью модели ЛА, а телесные углы по горизонтали и по вертикали рассчитываются исходя и физических размеров экрана (ранее при использовании обычных экранов эти углы были 30 градусов по вертикали и 40 градусов по горизонтали), особенностью такого *3D*-индикатора является воздействие на заданные составляющие зрительного аппрета человека, что позволяет при использовании такого индикатора подготовленному человеку профессионально тренировать свой глазомер [3];
- компьютерный генератор изображения, ориентированный на синтез по алгоритмам компьютерной графики на плоском экране *2D*-проекций *3D*-моделей

II. Материалы и методы

Авиационные тренажёры должны формировать у *i*-го лётчиков во время полёта профессиональные навыки пилотирования $X_i^{(D)}$ и самолётовождения $X_i^{(N)}$ которые

откладываются в составляющих его когнитивной модели X_i [4]. При реальном подлёта на АТ i-ый лётчик формирует:

$$X_i = X_i^{(D)} \bigcup X_i^{(N)}, \quad (1)$$

$$X_i^{(D)} = F_i^{(D)}\left(T, X^{(D)}, X^{(M)}\right), \quad (2)$$

$$X_i^{(N)} = F_i^{(N)}\left(T, X^{(N)}, X^{(D)}, X^{(M)}\right), \quad (3)$$

$$T = T^{(1)} + T^{(2)} + T^{(3)}, \quad (4)$$

где T – общее время затраченное i-ым лётчиком на подготовку к полётам $T^{(1)}$, время налёта на реальном ЛА $T^{(2)}$ и время налёта на АТ $T^{(3)}$.

$F_i^{(D)}$ – функция показателей умения i-го лётчика считывать информацию от приборов кабинного оборудования $X^{(D)}$ и его умения использовать дополнительно информацию получаемую через зрительный анализатор рассматривая через остекление кабины изображение $X^{(M)}$ окружающего 3D-пространства M для пилотирования ЛА летящего в реальной среде;

$F_i^{(N)}$ – функция показателей умения i-го лётчика решать навигационные задачи считывая информацию $X^{(N)}$ от приборов кабинного оборудования $X^{(D)}$ и его умения считывать необходимую информацию получаемую через зрительный анализатор, что предполагает умение найти необходимые реперные 3D-объекты рассматривая через остекление кабины изображение $X^{(M)}$ доступной части окружающего пространства M.

При полёте на АТ i-ый лётчик формирует:

$$X_i^{(S)} = X_i^{(D_S)} \bigcup X_i^{(N_S)}, \quad (5)$$

$$X_i^{(D_S)} = F_i^{(D)}\left(T, X^{(D_S)}, X^{(M_S)}\right), \quad (6)$$

$$X_i^{(N_S)} = F_i^{(N)}\left(T, X^{(N_S)}, X^{(D_S)}, X^{(M_S)}\right), \quad (7)$$

$$T = T^{(1)} + T^{(2)} + T^{(3)}, \quad (8)$$

где T – общее время затраченное i-ым лётчиком на подготовку к полётам $T^{(1)}$, время налёта на реальном ЛА $T^{(2)}$ и время налёта на АТ $T^{(3)}$.

$F_i^{(D)}$ – функция показателей умения i-го лётчика считывать информацию от имитаторов приборов кабинного оборудования $X^{(D_S)}$ (считая что он во время полёта на ЛА считывает информацию от реальных приборов кабинного оборудования $X^{(D)}$) и его умения использовать дополнительно информацию получаемую через зрительный анализатор рассматривая изображение $X^{(M_S)}$ доступной части 3D-модели окружающего пространства M_S для пилотирования модели ЛА;

$F_i^{(N)}$ – функция показателей умения i-го лётчика решать навигационные задачи $X^{(N)}$ считывая информацию от имитаторов приборов кабинного оборудования $X^{(D)}$ и его умения использовать информацию получаемую через зрительный анализатор, что предполагает умение найти необходимые 3D-модели реперных объектов рассматривая через остекление кабины изображение $X^{(M_S)}$ доступной части 3D-модели окружающего пространства M_S.

Так как создать полную модель невозможно, при синтезе $X^{(D_S)}$ кроме полезной информации $X^{(D_S^R)}$всегда синтезируется ошибочная информация $X^{(D_S^F)}$, что относится и к информации необходимой для пилотирования ЛА, и к информации необходимой для решения задач самолётовождения.

$$X^{(D_S)} = X^{(D_S^R)} \bigcup X^{(D_S^F)}, \quad (9)$$

Заказчик промает АТ когда

$$X^{(D_S^R)} \gg X^{(D_S^F)}, \quad (10)$$

что бывает, когда полёты на АТ разрешены в одной из УС, когда выполняется (10).

III. Заключение

1. Обучение лётчика на авиационном тренажёре возможно только в учебных ситуациях, когда минимальная вероятность привития лётчику во врем полёта на тренажёре ложных навыков.

2. Назначение авиационного тренажёра формировать у лётчика во время полёта заданные составляющие его когнитивной модели в которых отложен его опыт сформированный и во время предполётной подготовки и во время полётов на реальном летательном аппарате и при полёте на авиационном тренажёре в разрешённых учебных ситуациях.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00445, https://rscf.ru/project/25-21-00445/

Литература

[1] *В.Р. Роганов, М.Ю. Михеев,* “Управление ресурсами специализированной системы синтеза изображения района полетов для авиационного тренажера”, *Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 3, с. 48-60.*

[2] *V.R Roganov*, “*Methods and means for forming elements of a cognitive model of a human observing 3D models synthesized by aircraft simulator simulators”*. Industrial ACS and Controllers. 2022. No. 12, pp. 32-39.

[3] *В.Р. Роганов, “*Концепция создания эргатического оптико-программно-технического комплекса "имитатор визуальной обстановки", позволяющего человеку тренировать глазомер” *, XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.* 2015. Т. 1. № 4 (26). – с. 81-87.

[4] *В. Р. Роганов, Г. В. Короп, М.Ю. Михеев, “*Имитатор визуальной обстановки, синтезирующий в зрительном диапазоне электромагнитных волн внешний вид пространства вокруг кабины авиационного тренажёра”. *Управление большими системами. Технические и программные средства управления* Выпуск 112, с.338-356.

An approach to integrating software systems based on a fuzzy rule base using the PLM complex data bus

L. Kamaletdinova, A. Romanov, T. Istyukov, A. Stadnikov
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia,
lribragimova1995@gmail.com, romanov73@gmail.com,
timon.istiukov@mail.ru, a.stadnikov@ulstu.ru

***Abstract**. The paper discusses the subject of production information systems integration with third-party information system in order to decrease data binding complexity. In the existing solutions for integration, it is assumed that a specialist for integration itself writes the program code and as may be required in special occasions. It is suggested to use a control system, which is based on metamodel of an integrated information system and hierarchical rule base with fuzzy logic inference. The novelty of the proposed approach is in the formed metamodel, distinguished by the ability to display key processes during information exchange, and the use of a hierarchical rule base built on its basis. The approach described in this paper provides reducing the operator's role in the production process by 41-49.83%.*

I. Introduction

Organizing information management is difficult and complex task for every manufacturer. In most cases, existing PLM systems are capable of fulfilling production needs. In the same time, such systems exclude simple integration and proprietary solutions in information management. Various manufacturers are using several PLM systems but this approach demands additional integrations in order to represent data and provide with central management. There are many PLM systems, several systems with an API integration, several individual systems connected with separate components of PLM systems by integration scripts. Such solution for integration is not flexible. Each integration script is considering one-sided data display, resulting in developing two or more individual scripts.

It takes significant amount of resources in terms of time and effort to update such scripts and more resources are required for additional data insert.

PLM-system contain a module set, each module has its own user interface, own database and own program interface to connect with other components. Each module of PLM-system connected with enterprise data bus via API (REST API). Such data bus unites these modules into single program interface, which allows displaying data in due time and keep updating information at the production site. Enterprise information system has its own user interface, own database and own program interface as well.

As of now centralized data management at the enterprise is carried out by an operator. His duties include the timely data display and emergency response.

Operator’s sequence of activities consists of following steps:

- Enter the end item test sheet into the information system according to product serial number.
- Fill in product passport in the information system.
- Get sensor number (formed from product serial number) from the information system.
- Generate production plan from PLM system (reference data module).
- Enter complete product (sensor) data into PLM system (warehouse module).
- Create invoice document.

According to this sequence, operator must enter and update data in different systems and modules in the PLM-system. Thus, the problem of the effective centralized data management occurs, conditioned by the need to minimize the human influence factor. The intent is to develop and implement systems that provide automated management and control over production data. The paper proposes to use a control system as a solution to the problem. The control system is based on the data management approach, which implies building a model and rules of interaction with the integrated system only based on the data of the integrated system's storage. The model of ongoing processes is built exclusively on the time stamps of the database, the behavior log of the integrated system and the storage (database), as well as

on the existing database connections. It is assumed that the database will be implemented in the third normal form. The rules of interaction are representing a hierarchical rule base with fuzzy logic inference, suitable for integration with the PLM-system data bus.

II. The task of integrating a third-party information system and the data bus of the plm-system

As a solution to the problem of reducing the operator's time expenditures in production, it is proposed to use a control system based on a metamodel and a hierarchical rule base with fuzzy logical inference [1]. The control system allows for the automation of the integration process from the side of the integrated system and the data bus.

Based on the data bus architecture [2], the integration with the control system requires sender identification, recipient identification, and interaction rules within the data bus between systems to ensure stable operation. Despite the fact that some message brokers suggest additional message processing algorithms for directing messages to recipients, this algorithm will be embedded at the moment of setting up the interaction within the data bus at the initial stage when forming interaction rules.

Thus, the following processes of interaction between the control system and the data bus are identified:

- The process of pre-configuring the data bus based on the metamodel.
- The process of message exchange between the data bus and the control system based on a rule base with fuzzy logic inference.

The process of message exchange between the data bus and the control system is continuous and occurs in real-time, allowing for automatic response to incoming messages and generating a reply. The control system operates in the background and, in case of emergencies, issues an error message to the operator.

In this case, the operator’s task is to perform final adjustment of the data bus for the whole system. In order for the correct interaction between the integrated system and PLM-system, it is necessary to connect recipients and existing systems declared on the data bus.

III. Theoretical Results and the percentage of the operator's participation in the implementation of the approach

The sequence of operator actions after using the control system consists of the following steps:

- Final data bus adjustment for interaction with the control system from message recipient’s perspective while interacting with the information system.
- Enter the end-item test sheet into the information system according to product serial number.
- Fill in product passport in the information system.
- Generate production plan from PLM system (reference data module).

Consider that the first step is completed once and is not presented in the sensor manufacturing process. After the request for the production plan, the invoice is automatically generated and saved in the specific file storage (set in the control system settings).

The number of produced sonars is denoted as n, then the number of steps according to the first algorithm is $6n$, and the number of steps according to the second algorithm is $1+3n$. The percentage ratio can be computed as:

$$\frac{6n - (1 + 3n)}{6n} * 100\% \quad (1)$$

For example, according to expression (1) with a production volume of 100 sensors, the reduction in human input is 49.83%, while with a minimum volume of 2 sensors, the reduction will be 41%.

IV. Conclusion

The aim of this work was to reduce the operator's labor costs in production by using a control system in the task of integrating the information system and the data bus of the PLM. Within the

framework of the study, the information support scheme of a manufacture in Ulyanovsk, Russia was examined. A problem of effective organization of centralized data management in production was identified. To solve this problem, a classification of integrated systems and integration methods was conducted, and an integration approach using a control system was proposed. The approach described in this paper provides reducing the operator's role in the sensor production process by 41-49.83% according to the workload.

References

[1] *Kamaletdinova, L., Romanov, A., Filippov, A., Yarushkina, N.*, Forming a Rule Base for Product Lifecycle Management Systems // *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, 1209 LNNS, pp. 288–300.

[2] *Kamaletdinova L. R., Romanov A. A., Faskhutdinov I. I., Istyukov T. A.,* Review and identify common concepts in data organization when using ESB // *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University* 108(4), 2024, pp. 47-50.

Проектирование следящей модели для динамического сглаживания примитивных траекторий мобильных роботов в реальном времени

Л.Г. Ли, Ю.Г. Кокунько
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
lovelee138138@gmail.com, juliakokunko@gmail.com

***Аннотация**. Для сглаживания примитивной траектории, определяющей путь следования мобильного робота в первом приближении, предложена следящая динамическая модель, корректируемая вложенными сатураторами с переменными коэффициентами усиления, что позволяет повысить точность аппроксимации примитивной траектории на прямолинейных участках. В алгоритме настройки автоматически учитываются заданные динамические ограничения мобильного робота и особенности примитивной траектории.*

При выполнении различных рабочих сценариев мобильными роботами базовой задачей является движение по заданной траектории, генерируемой в режиме online или спроектированной в режиме offline. В режиме безостановочного движения необходимо, чтобы эталонная траектория была достаточно гладкой, а абсолютные значения ее первой–третьей производных не превышали ограничений робота на скорость, ускорение и рывок.

Для построения гладких траекторий по заданному набору опорных точек традиционно применяются аналитические методы. В настоящее время наибольшее распространение получили кривые Безье, основанные на геометрических построениях, и B-сплайны, основанные на алгебраических системах уравнений [1–3]. Однако при обработке большого массива опорных точек с учетом заданных ограничений эти методы несут большую вычислительную нагрузку [4], что ограничивает их реализацию в реальном времени на бортовых компьютерах с ограниченной оперативной памятью.

В работах [5, 6] предложен принципиально другой, динамический подход к проблеме сглаживания опорных (примитивных) траекторий, который имеет небольшую вычислительную сложность, не возрастающую с ростом массива опорных точек, и одинаково эффективен как в режиме offline, так и в режиме online. Он заключается в применении автономной канонической модели с корректирующими воздействиями в виде вложенных сигмовидных функций с постоянными коэффициентами усиления. Данная модель настраивается в рамках блочного подхода как следящая система (следящий дифференциатор) с заданными ограничениями на динамические характеристики [7]. На ее вход поступает опорная негладкая траектория в виде непрерывного или дискретного сигнала, а ее выход порождает гладкий аналог примитива в сигнальном виде, который поступает в информационно-управляющую систему робота в качестве эталонной реализуемой траектории. Другие переменные данной модели воспроизводят производные эталонной траектории, которые удовлетворяют заданным ограничениям. Количество блоков модели (т.е. порядок восстанавливаемых производных) зависит от количества учитываемых динамических ограничений и производных задающих воздействий, требуемых для синтеза траекторного управления.

В данной работе представлена модификация указанного метода динамического сглаживания примитивных траекторий на плоскости или в пространстве. В следящем дифференциаторе корректирующие воздействия вместо вложенных гладких сигмовидных функций с постоянными коэффициентами усиления представляют собой вложенные кусочно-непрерывные функции с насыщением (сатураторы) с переменными коэффициентами усиления. Показано, что замена типа корректирующих воздействий, с одной стороны, также обеспечивает ограниченность динамических характеристик и не влияет на плавность генерируемого выходного сигнала, а, с другой стороны, приводит к более простой реализации и базовой системе неравенств для выбора постоянных коэффициентов усиления. Научная новизна предлагаемого метода заключается в

разработанной адаптивной процедуре настройки переменных коэффициентов усиления, которая обеспечивает меньшую ошибку аппроксимации примитивной траектории без потери эффекта сглаживания.

Кратко опишем основные этапы проектирования предлагаемой следящей модели применительно к задаче генерации эталонной траектории на плоской поверхности для центра масс колесной платформы. Обозначим $y \in Y \subset R^2$ – вектор положения центра масс колесной платформы в заданной области Y декартовой системы координат. Введем ограничения, накладываемые на развиваемые скорость, ускорение и рывок робота:

$$\left\|y^{(i)}\right\| \le Y_i, i = 1,2,3 \tag{1}$$

Пусть $g(t) \in Y \subset R^2$ – примитивная негладкая траектория в конкретном рабочем сценарии, полученная или на этапе планирования (например, путем соединения опорных точек отрезкам с учетом времени их посещения), или поступающая в реальном времени в виде векторного сигнала из автономного источника. Скорость ее изменения неизвестна, но полагается допустимой

$$\|\dot{g}\| \le G_1 < Y_1 \tag{2}$$

Ставится задача сглаживания примитивной траектории и восстановления первой и второй производной с учетом (1) в сигнальном виде. С этой целью вводится трехблочная следящая динамическая модель, корректируемая вложенными сатураторами:

$$\begin{gathered}\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = -p_3 \mathrm{sat}\left(l_3\left(x_3 + p_2 \mathrm{sat}\left(l_2\left(x_2 + p_1 \mathrm{sat}\left(l_1(x_1 - g)\right)\right)\right)\right)\right),\end{gathered} \tag{3}$$

где $x_{1,2,3} \in R^2$, $p_i = \mathrm{const} > 0, l_i = \mathrm{const} > 0$, $p_i \mathrm{sat}(l_i s_i) = (p_i \mathrm{sat}(l_i s_{i1}), p_i \mathrm{sat}(l_i s_{i2}))^{\mathrm{T}}$, $i = 1,2,3,$

$s_1 = x_1 - g, s_2 = x_2 + p_1 \mathrm{sat}(l_1(x_1 - g)), s_3 = x_3 + p_2 \mathrm{sat}(l_2(x_2 + p_1 \mathrm{sat}(l_1(x_1 - g))))),$

$$p_i sat(l_i s_{ij}) = \begin{cases} p_i sign(s_{ij}), \left|s_{ij}\right| > 1/l_i, \\ p_i l_i s_{ij}, \left|s_{ij}\right| \le 1/l_i, j = 1,2. \end{cases}$$

Лемма. Пусть система двойных неравенств

$$\begin{cases} 1/l_2 + G_1 < \mathrm{p}_1 \le Y_1 - 1/l_2, \\ 1/l_3 + 2p_1^2 l_1 < p_2 \le Y_2 - 1/l_3, \\ 2p_2^2 l_2 < p_3 \le Y_3. \end{cases} \tag{4}$$

при фиксированных $Y_i > 0, i = 1,2,3$ (1), $G_1 < Y_1$ (2) имеет непустое множество положительных решений, в частности $p_{i0} > 0, l_{i0} > 0, i = 1,2,3$. Тогда при их установке в следящую систему (3) с начальными значениями $x_1(0) = g(0), x_{2,3}(0) = \vec{0}$ на протяжении всего процесса слежения будут выполнены неравенства:

$$\|x_1(t) - g(t)\| \le \frac{1}{l_{10}}, \left\|\mathrm{x}_1^{(i)}(t)\right\| < Y_i = const > 0, i = 1,2,3, t \ge 0 \tag{5}$$

Первое неравенство (5) определяет ошибку отслеживания примитивной траектории, что является мерой ее сглаживания в углах, но на прямолинейных участках является ошибкой аппроксимации. Если $\left\|\dot{g}(t)\right\| = G_1, t \ge 0,$ то в рамках данного метода точность аппроксимации примитива не может быть улучшена и зависит от максимально возможного l_1, полученного при решении (4). Если есть основания полагать, что $\dot{g}(t)$ существенно меняется в допустимом диапазоне (2), то можно уменьшить ошибку аппроксимации на участках, где $\left\|\dot{g}(t)\right\| < G_1$, путем варьирования коэффициентов усиления следящей модели (3).

Из неравенств (4) следует, что уменьшение p_1 влечет за собой увеличение l_1, что и требуется для уменьшения ошибки (5). Текущее значение $\dot{g}(t)$ не известно, но ее гладким аналогом служит векторная переменная $x_2(t)$ системы (3). Этот факт позволяет ввести следующие переменные коэффициенты

$$p_{1\text{var}} = 1/l_2 + \|x_2\| + \alpha_1 \le p_{10}, l_{1\text{var}} = 0.5(p_{20} - 1/l_{30} - \alpha_2)/p_{1\text{var}}^2 \ge l_{10}, \quad (6)$$

которые удовлетворяют неравенствам (4) и уменьшают ошибку аппроксимации (5). В (6) малые константы $\alpha_{1,2} > 0$ вводятся для того, чтобы в первом и втором выражениях (4) левые неравенства оставались строгими.

Таким образом, предложенный адаптивный алгоритм настройки (6) коэффициентов усиления позволяет автоматически учитывать особенности примитивной траектории без дополнительного динамического расширения следящей модели (3).

Универсальность предложенного подхода заключается в том, что данный алгоритм без существенных изменений применим для сглаживания примитивных пространственных траекторий, что достигается увеличением размерности блоков следящей модели (3): $x_{1,2,3} \in R^3$. Результаты моделирования динамических моделей (3), (6), порождающих с учетом заданных ограничений эталонные траектории при отслеживании опорных сигналов, продемонстрировали их высокую производительность при сглаживании ломаных сложных конфигураций на плоскости и в пространстве.

Исследованы особенности дискретной реализации базового (3), (4) и адаптивного (6) алгоритмов на бортовых компьютерах с ограниченной тактовой частотой.

Литература

[1] *J. Pan, L. Zhang, D. Manocha*, “Collision-free and Smooth Trajectory Computation in Clut-tered Environments”, *International Journal of Robotics Research,* vol. 31, 2012, pp. 1155–1175.

[2] *T. Mercy, R. Van Parys, G. Pip*eleers, “Spline-Based Motion Planning for Autonomous Guided Vehicles in a Dynamic Environment”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* vol. 26 (6), 2017, pp. 2182–2189.

[3] *Y. Sun, J. Yang, D. Zhao, Y. Shu, Z. Zhang, S. Wang*, “A Global Trajectory Planning Framework Based on Minimizing the Risk Index”, *Actuators,* vol. 12 (7), 2023, p. P. 270.

[4] *R.F. Gilimyanov, L.B. Rapoport*, “Path Deformation Method for Robot Motion Planning Problems in the Presence of Obstacles”, *Autom. Remote Control,* vol. 74 (12), 2013, pp. 70–76.

[5] *S.A. Krasnova, J.G. Kokunko, S.A. Kochetkov, V.A. Utkin*, “Generation of Achievable Three-Dimensional Trajectories for Autonomous Wheeled Vehicles via Tracking Differentiators”, *Algorithms*, vol. 16 (9), 2023, p. 405.

[6] *J.G. Kokunko, S.A. Krasnova*, “Generation of Smooth Reference Trajectories for Unmanned Wheeled Platforms Considering Automatic Constraints On Velocity, Acceleration and Jerk”, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 25(6), 2024, pp. 320–331 (In Russian).

[7] *A.S. Antipov, S.A. Krasnova, V.A. Utkin*, “Synthesis of Invariant Nonlinear Single-Channel Sigmoid Feedback Tracking Systems Ensuring Given Tracking Accuracy”, *Autom. Remote Control*, vol. 83 (1), 2022, pp. 32–53.

Стенд для исследования скоростных и энергетических характеристик микротурбины со струйно-мембранной системой управления

П. А. Тимошев
Московский авиационный институт, г. Москва, Россия,
p.timoshev@gmail.com

Аннотация. *Объектом исследования является микротурбина, предназначенная для использования в качестве силового привода в колесном транспортном средстве со струйно-мембранной системой управления. Усовершенствована физическая модель механической части стенда для экспериментального исследования скоростных и энергетических характеристик в части реализации измерительного диска - энкодера. Создан и протестирован блок датчиков энкодера. Разработан и реализован алгоритм определения частоты вращения ротора микротурбины.*

I. Введение

Исследование посвящено разработке стенда для экспериментальных исследований передаточных характеристик «давление питания – частота вращения» пневматической микротурбины, а также девиации частоты вращения при различной нагрузке на валу.

Актуальность темы исследования определяется необходимостью создания прикладных расчетно-экспериментальных методик разработки микротурбин, предназначенных для использования в качестве силовых приводов для радиационностойких роботов, исполнительных механизмов струйно-мембранных систем управления для решения широкого класса задач в условиях жестких дестабилизирующих факторов.

II. Разработка конструкции стенда; принцип работы

ДПТ приводится во вращение при помощи регулируемого источника напряжения. При уравновешивании мощностей ДПТ и микротурбины вращение прекращается.

На валу ДПТ закреплен измерительный бинарный диск, на котором нанесены поочередно черные и белые секторы – всего 36. Один сектор имеет ширину (плоский угол) в 3 раза больше остальных; этот сектор является нуль-меткой, необходимой для определения одного полного оборота вала. Напротив диска размещены два диода: фотодиод и светодиод. Светодиод излучает световой импульс в инфракрасном диапазоне на измерительный диск, после чего отраженный импульс регистрируется фотодиодом. Поскольку белые и черные секторы имеют различные коэффициенты отражения, интенсивность светового импульса, считываемого фотодиодом, также будет различной.

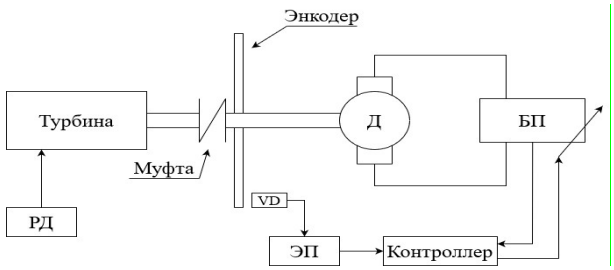


Рис. 1. Структурная схема САУ

Ток, протекающий через фотодиод, вызывает падение напряжение такой же частоты на постоянном резисторе – датчике тока. Далее, напряжение с резистора поступает на дифференциальный усилитель, где оно фильтруется от помех, порождаемых дребезгом измерительного диска и внешним электромагнитным полем, усиливается, и преобразуется в стандартный логический сигнал для микроконтроллера. В соответствии с измеренной частотой контроллер генерирует и передает команды управления на регулируемый блок питания, который

плавно увеличивает напряжение питания ДПТ до тех пор, пока измеренная частота не будет равна нулю (при определении максимальной мощности на валу микротурбины) либо заданной уставке частоты (при определении мощности для заданной частоте вращения). Кроме того, на основе разницы частот вращения вала в интервале между двумя последовательными отсчетами нуль-метки, контроллер производит вычисление девиации частоты вращения.

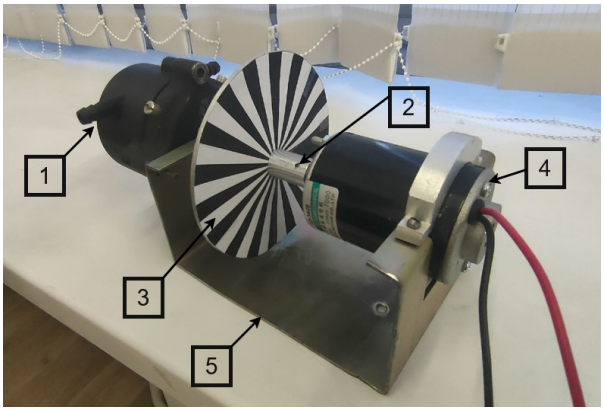


Рис. 2. Изготовленная механическая часть стенда

III. Доработка механической части стенда и измерительного энкодера

Механическая часть стенда на данный момент содержит следующие основные части:

- микротурбина;
- муфта;
- энкодер;
- двигатель (Д);
- регулируемый блок питания (БП);
- контроллер;
- электронный преобразователь (ЭП);

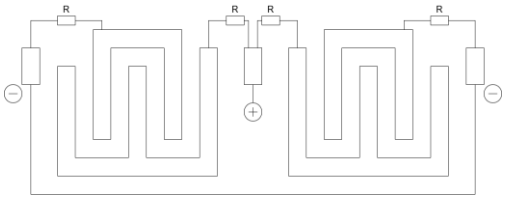


Рис. 3. Схема платы для диодов

Изготовлен и протестирован ЭП – печатная плата с установленными свето- и фотодиодами, датчиком тока, дифференциальным усилителем с пассивными элементами и электрическими соединителями. Электронный преобразователь соединен с управляющим микроконтроллером, который обрабатывает сигнал в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 4.

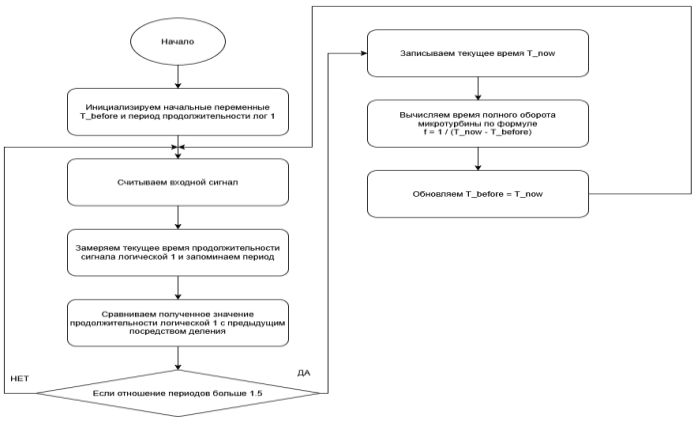


Рис. 4. Алгоритм расчета частоты вращения микротурбины на Arduino UNO R3

Разработан алгоритм вычисления частоты вращения ротора микротурбины.

Сигнал с ЭП поступает на вход микроконтроллера, где реализуется алгоритм расчета частоты вращения микротурбины.

Алгоритм вычисления частоты представляет собой следующую последовательность операций:

4.1) считываем входной сигнал;

4.2) если логическая единица – вычисляем его продолжительность и запоминаем.

4.3) сравниваем продолжительности текущего и предыдущего сигналов «1», и если их отношение больше 1,5 – запоминаем текущий сигнал как время появления нуль метки;

4.4) вычисляем значение частоты по формуле (1).

$$f = \frac{1}{t_{\text{т}} - t_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где f – частота вращения вала микротурбины, Гц; $t_{\text{т}}$, $t_{\text{пр}}$ – текущее и предыдущее время считывания нуль-метки, с.

Таким образом, создан экспериментальный стенд для исследования скоростных и энергетических характеристик микротурбины со струйно-мембранной системой управления. При этом регулировка режимов работы стенда осуществляется вручную. В этой связи, задача будущих исследований заключается в создании системы автоматического управления, обеспечивающей возможность определения характеристик микротурбины во всем рабочем диапазоне, без использования ручной регулировки давления питания микротурбины и напряжения питания двигателя постоянного тока.

Литература

[1] *Балабанов А. В., Безменов В. С., Мамонтова А. А., Сухоруков А. А.* Командное устройство систем управления радиационностойких роботов на струйно-мембранной элементной базе // Датчики и системы. 2022. № 4. С. 42-46.

[2] *Касимов А. М., Балабанов А. В.* Метод разработки микроструйных функциональных узлов робастных резервных систем управления критическими объектами / *Материалы 26-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС'2018, Москва)*. М.: ИПУ РАН. 2018. С. 284-288.

[3] *Касимов А. М., Мамедли Э. М., Мельников Л. И.* Вопросы разработки и реализации разнородной системы управления летательным аппаратом // *Датчики и системы*, № 5. 2012. С. 2-6.

[4] *Ивчин В. А., Самсонов К. Ю., Касимов А. М., Попов А. И.* Разработка технического решения по предупреждению попадания одновинтового вертолета в неуправляемое вращение // *Научный Вестник МГТУ ГА*. Т. 25. № 3. 2022. С. 51-60.

О запасах управления до наступления предельных состояний на примере малого подводного аппарата

И. Ю. Липко
Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия,
ivanlipko@yandex.ru

***Аннотация**. Статья посвящена вопросу исследования управляющих сигналов подводного аппарата при воздействии на него внешних случайных возмущений, изучения величины насыщения каналов управления при воздействии внешних возмущений различной амплитуды. Актуальность связана с повышением энергоэффективности эксплуатации подводных аппаратов при выполнении работ различного характера. Основным методом является решение оптимизационной задачи с функционалом действия в качестве целевой функции и уравнением динамики подводного аппарата и внешней среды в качестве дифференциального уравнения связи. В результате решения задачи получаются наиболее вероятные траектории движения подводного аппарата к заданным состояниям, внешних воздействий, приводящих аппарат к этим состояниям, и сигнала управления. Эти траектории рассматриваются на предмет качества движения к заданным состояниям, уровню насыщения каналов управления. По результатам моделирования подводного аппарата под воздействием внешних возмущений получены данные, которые могут быть использованы для интерпретации и изучения синтезированных регуляторов. Полученные траектории могут быть использованы для отбора более сильных регуляторов.*

I. Введение

Рассматривается малый подводный аппарат (ПА), двигающийся по заданному курсу под воздействием внешних возмущений. Задача аппарата двигаться вперёд таким образом, чтобы его отклонение не превышало заранее заданные допустимые углы отклонения. Такое описание встречается довольно часто для различных практических задач: начиная от вопросов навигации и следования по заданному курсу, например, движение подводного судна, выполняющего мониторинг трубопроводов, электрокабелей, лежащих на дне моря или океана; заканчивая стыковкой и соединением подводного аппарата со стыковочным модулем – базой, наблюдением за объектами интереса.

В статье предлагается исследовать запасы управления в каналах управления в зависимости от того, насколько текущее состояние близко к предельному состоянию. Под запасом управления имеется ввиду отсутствие перенасыщения, уровень управляющего сигнала. Считаем, что моторы не отдают бесконечную мощность, а, следовательно, и управляющие сигналы на исполнительные механизмы не могут превышать какого-то значения. Под предельным состоянием будем понимать недопустимое состояние подводного аппарата, его отклонение на курсовой угол, которое может быть опасным с точки зрения его эксплуатации или приводить к нежелательным последствиям.

II. Постановка задачи

Пусть задана система дифференциальных уравнений, описывающая поведение ПА в=под воздействием внешних возмущений

$$\dot{x} = Ax + \sigma\xi(t), x(0) = x_0, \quad (1)$$

где x – вектор состояния, A – матрица системы (объекта с управлением и внешнее возмущение), σ – волатильность, образующая матрицу диффузии $a = \sigma\sigma^T$, $\xi(t)$ – гауссовский белый шум, x_0 – начальное состояние. Здесь ξ описывает долю неизвестности внешнего возмущения, которое сложно описать аналитически, позволяет формировать случайный характер внешнего возмущения.

Требуется выяснить наиболее вероятную траекторию x^*, вид сигнала управления u^* ПА до достижения предельного состояния x_{thr}, оценки времени до достижения этого состояния и до

того момента, когда наступает насыщение в канале управления, при условии, что аппарат управляется некоторым законом управления в обратной связи.

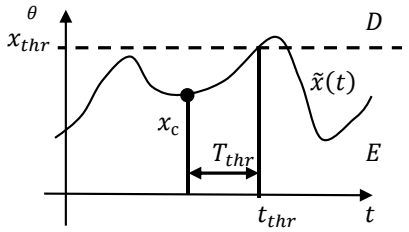


Рис.1. Траектория отклонения курса подводного аппарата

III. Математическое описание

Для получения наиболее вероятных траекторий используется метод, хорошо известный из теории больших уклонений [1,2], связанный с поиском минимума т.н. функционала действия $S_T = \int_0^T (\dot{x} - Ax)^T \sigma\sigma^T (\dot{x} - Ax)\, dt$. Поскольку функционал действия характеризует затрачиваемую системой энергию, то его интерпретация приводит к тому, что мы находим такое поведение системы, при котором внешние возмущения выступают как бы «управлением», которое с наименьшими для себя вкладом переводят систему в исследуемое состояние x_{thr}.

В уравнение объекта (1) вводится малый параметр ε:

$$\dot{x} = Ax + \varepsilon\sigma\xi(t), \qquad x(0) = x_0 \tag{2}$$

Для (2) решается задача минимизации для случая бесконечного слева времени и выхода из аттрактора

$$x^* = \arg \min_{x(-\infty)=0, x(0)=x_\Pi} V(O, x_\Pi) \tag{3}$$

где $V(O, x_\Pi) = V(\infty, O, x_\Pi)$ – квазипотенциал. Результат (3) имеет смысл ввиду того, что для системы (2) известна оценка вероятности пересечения траектории области D

$$\lim_{\varepsilon\to 0} \varepsilon^2 P(x \in D) = -\min_{y \in D \cup \partial D} V(t, x, y)\,, \tag{4}$$

где $V(t, x, y) = \min_{\varphi_0 = x, \varphi_t = y} S_t(\varphi)$ – квазипотенциал из состояния x в состояние y в течении времени t. В результате решения получаем кортеж, включающий в себя инстантон и время, оставшееся до достижения порогового состояния. Поскольку задача решается числено, то мы имеем дискретные представления для инстантона, а его длина ограничена.

Для демонстрации результатов используется математическая модель горизонтального движения автономного необитаемого ПА «MiddleAUV». Математическая модель горизонтального движения известна в виде передаточных функций от команд управления левым и правым моторами до угловой скорости [3]:

$$\omega_L(s) = \frac{0.09937s + 0.002391}{s^2 + 0.6365s + 0.01044},$$

$$\omega_R(s) = \frac{-0.06789s - 0.001905}{s^2 + 0.6561s + 0.01234},$$

и от команд управления левым и правым моторами до линейных скоростей:

$$V_L(s) = \frac{-0.0197s + 0.002171}{s^2 + 0.3246s},$$

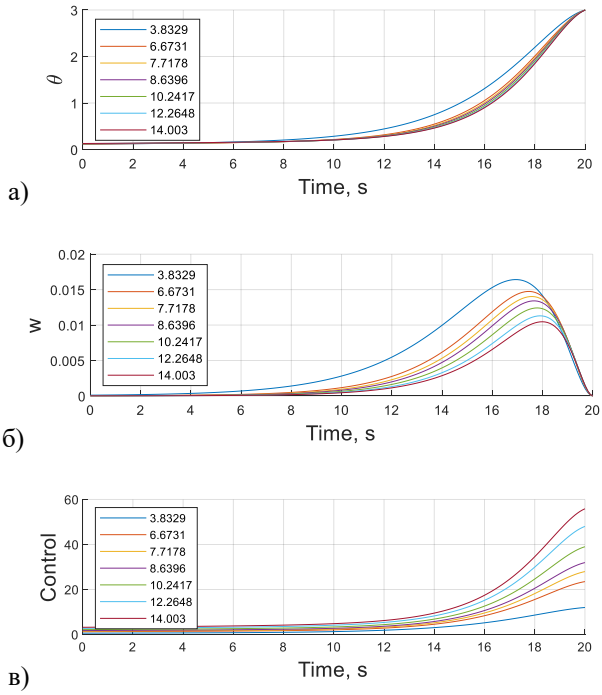
$$V_R(s) = \frac{-0.06789s - 0.001905}{s^2 + 0.2563s + 0.0037}$$

Используя эти передаточные функции, была сформирована система вида (1), включающая в вектор состояния курс, скорость угла курса, линейные скорости горизонтального движения.

Матрица *A* включает контур управления для стабилизации курса, а итоговая модель получается 10-го порядка. В качестве управления применяется ПИД-регулятор и LQR-регулятор.

IV. Результат

В результате решения задачи (3) для уравнений ПА и внешних возмущений были получены наиболее вероятные траектории движения ПА к нескольким предельным состояниям, оценки вероятности достижения этого предельного состояния (рис. 2). Основываясь на этих данных, возможно осуществлять интерпретацию воздействия внешних возмущений на систему и находить пороги насыщения или потери управления.



а)

б)

в)

Рис.2. Наиболее вероятные траектории отклонения курса (а),
внешнего воздействия (б) и управления (в)

V. Заключение

В статье рассмотрена модель подводного аппарата и управления, позволяющего ему не отклоняться от заданного курса при движении. Получены наиболее вероятные траектории движения при воздействии на систему внешних случайных возмущений для разных контуров управления системой. Наглядно показаны управляющие сигналы, которые появляются при достижении предельных углов отклонения от курса.

Предлагаемая статья носит поисковый и дискуссионный характер, которая скорее призвана помочь сформулировать вопросы о построении таких законов управления, чтобы не только уменьшать амплитуду отклонения от заданных режимов управления, но и если не гарантировать превышение предельного состояния, то утверждать о возможности не превышать его в течение некоторого времени.

Литература

[1] *S. A. Dubovik, A. A. Kabanov, I. U. Lipko*. Situational Control in Stochastic Systems. Proceedings of 2019 3rd *International Conference on Control in Technical Systems*. St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 64-68. – DOI 10.1109/CTS48763.2019.8973334.

[2] *И. Ю. Липко, А. В. Титов.* Онлайн прогноз времени присутствия с помощью a-профилей в задаче стабилизации курса АНПА. *Морские интеллектуальные технологии*. – 2023. – № 1-1(59). – С. 254-260.

[3] *И.Ю. Липко*. ПИД-управление движением малого подводного аппарата по маршрутной траектории. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. – 2025. – Т. 10, № 5(55). – С. 185-188.

Разработка системы прогнозирования состояния посева сельскохозяйственной культуры на разных фазах развития растения

П. О. Скобелев, А. А. Галузин
Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия,
petr.skobelev@gmail.com, alekseygaluzin@mail.ru

***Аннотация**. В работе предложена система, реализующая концепцию метода расчёта выходных параметров сельскохозяйственной культуры в цифровом двойнике посевов растений в зависимости от окружающей среды. В основе данного метода лежит модель «трубок» – диапазонов оптимальных, нормальных и критических для выживания растений значений основных факторов, которые характеризуют основные фазы роста и развития растения и влияние входных параметров внутри каждого из интервалов на выходные параметры посева. Нахождением значения входного параметра в разных диапазонах трубки можно характеризовать развитие растения, так если растение находится в диапазоне рядом с критическими значениями, то растение угнетается. В докладе представлен метод расчета, который позволяет рассчитывать длительность фаз роста и развития растений и прогнозировать значения выходных параметров по фазам, такие как рост растения, а также описана разработанная система, реализующая данный метод. Приводится пример работы системы для сельскохозяйственной культуры «Озимая пшеница».*

I. Введение

Разработка методов адаптивного планирования и моделирования стадий роста и развития растений, прогнозирования урожайности актуальны и значимы для продуктивности и эффективности растениеводства. Одной из ключевых культур для Российской Федерации является пшеница [1]. Уменьшение влияния негативных факторов окружающей среды, которые влияют на развитие пшеницы, и оптимизация ресурсов для нормального развития растения, позволят повысить объём урожая и снизить экономические затраты.

II. Предлагаемый подход

Метод, реализованный в системе, заключается в разработке цифровых двойников посевов растений, которые являются цифровой моделью реального посева и позволяют прогнозировать его состояние на разных фазах развития растения в компьютерной среде по определённому агрономами ряду важнейших параметров, характеризующих растение на каждой стадии [2].

На основе экспертных знаний агрономов выделены составы и значения входных и выходных параметров на разных фазах развития растения x_{ijk} и составлены трубки влияния одного входного параметра на один выходной параметр (рис.1).

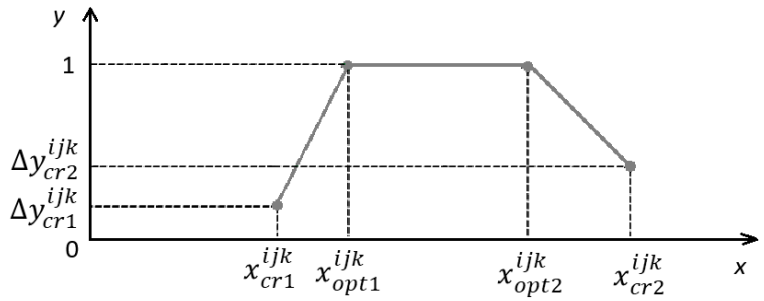


Рис. 1. Пример трубки входного параметра X и выходного параметра Y

Перед расчётом значений выходных параметров необходимо провести расчёт длительности фаз растения. Базовая длительность рассчитывается по правилу суммы активных температур. На базовую длительность фазы растения влияет предыдущее растение, росшее на месте растения

модели, и входные параметры на фазе. После расчета длительности фаз для каждого выходного параметра по одному входному параметру происходит расчёт дельты выходного параметра. Значение дельты выходного параметра по одному входному параметру для данной фазы рассчитывается как сумма изменений этого параметра на интервалах непрерывного входа в интервал трубки. После этого происходит расчет среднего значения дельты одного выходного параметра по всем необходимым входным параметрам как среднеарифметическое дельт одного выходного параметра по одному входному параметру. Затем выполняется расчёт итогового значения выходного параметра как сумма среднего значения дельты одного выходного параметра и значения этого выходного параметра на предыдущей фазе.

III. Описание разработанной системы

Система разработана на языке Java 17 с использованием фреймворка Spring, используя такие технологии как Jackson Databind, Web Servlet, JUnit, а также на языке JavaScript с использованием фреймворка Vue.js и функционирует под управлением операционных систем Windows 10 и выше.

В серверной части можно выделить два главных модуля:

- модуль преобразования данных, в состав которого входят сервисы предоставления данных: для пользовательского интерфейса; с пользовательского интерфейса для расчётов; модели из *json* файла;
- модуль расчёта в виде сервисов: длительности фаз растения; выходных параметров растения.

Веб-интерфейс позволяет задать входные данные (температура воздуха, запас питательной влаги, относительная влажность воздуха и др.) и представить результаты вычислений (масса растения, урожайность, количество листьев и др.) (рис. 2).

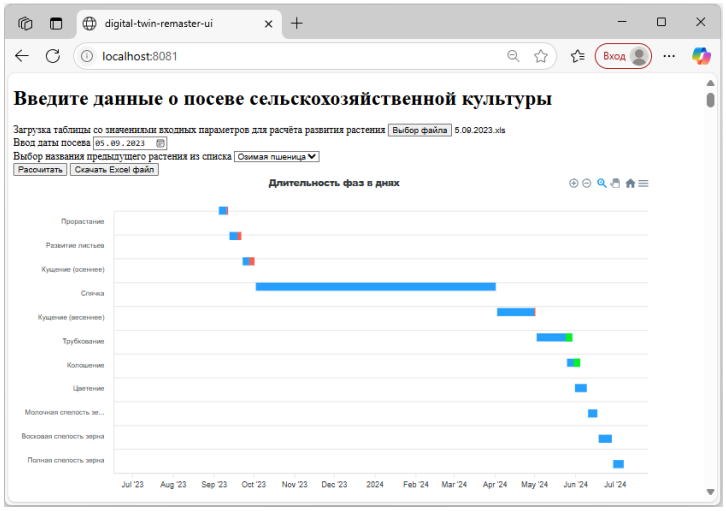


Рис. 2. Фрагмент веб-интерфейса системы

Для стадий развития представлена диаграмма их длительностей, где отмечено их сокращение или увеличение относительно базовых значений и другие особенности для лучшего понимания пользователем результатов. Для каждого входного параметра представляется график, где отображаются рекомендованные значения трубки, оптимальные и критические значения.

IV. Экспериментальные исследования

Проведено сравнение фактической высоты растения и рассчитанных значений (рис. 3). Данные о фактическом и прогнозируемом состояниях погоды на тестовых полях на сезон были взяты из открытых источников. Для оценки правильности расчётов взята модель цифрового двойника растения лаборатории «Цифровые двойники растений» СамНЦ РАН».

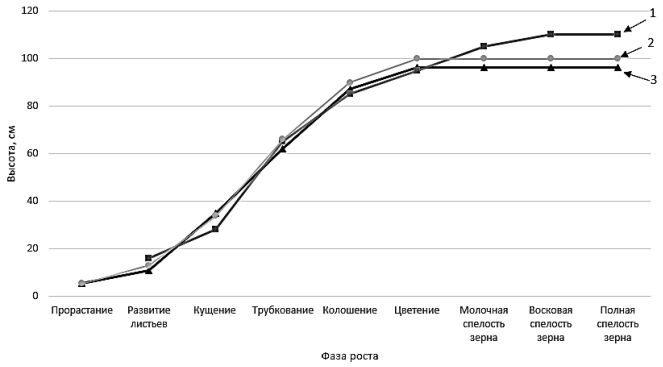


Рис. 3. Сравнение фактических и рассчитанных значений высоты растения,
где 1 – фактические значения, 2 – значения, рассчитанные моделью цифрового двойника растения, 3 – значения, рассчитанные предложенным методом

Фактическая высота растения на момент сбора урожая составила 110 см, значение, полученное с помощью модели цифрового двойника растения, – 99,88 см, значение, полученное с помощью предложенного метода, – 96,38 см. В используемой модели ожидаемая высота растения ограничивалась 100 см. В действительности растение выросло до 110 см, что подтверждает сложность моделирования процесса развития растения, зависящего от многих факторов.

V. Заключение

В работе представлена система, реализующая метод расчёта выходных параметров сельскохозяйственной культуры в цифровом двойнике посева растения. Система позволяет вводить параметры окружающей среды, дату посева и название предыдущего растения, росшего на поле, и на основе этих данных и модели трубок факторов прогнозировать значения выходных параметров посева. Проведённые исследования показали, что предложенный метод соответствует натурным данным, что позволяет считать его пригодной для практического применения агрономами и дальнейшего развития.

Литература

[1] *В.М. Зимняков,* “Производство пшеницы в России”*, Нива Поволжья,* 2020, № 1, с. 15–21.

[2] *V. Galuzin, A. Galitskaya, S. Grachev, V. Larukhin, D. Novichkov, P. Skobelev, A. Zhilyaev,* “Autonomous digital twin of enterprise: Method and toolset for knowledge-based multi-agent adaptive management of tasks and resources in real time”. *Mathematics.* 2022. №10. pp.1662-1689.

Алгоритм построения аналогового отпечатка устройства нижнего уровня автоматизированной системы на основе параметров его сигнала

Д. Н. Богачева, О. В. Лукинова, А. А. Рощин
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
bogacheva@ipu.ru, lobars@mail.ru, rochinaa@ipu.ru

Abstract. *В данной статье рассматривается проблема вмешательства злоумышленника в работу технологической (в т. ч. автоматизированной) системы путем подмены устройства нижнего уровня (датчика, счетчика) или его сигнала. Приводится краткая справка о существующих методах выявления подмены устройств. В качестве решения проблемы предлагается производить опознавание устройства на основе сравнения некоторых текущих параметров его аналогового сигнала с эталонными, собранными заблаговременно. Набор таких параметров представляет собой аналоговый отпечаток устройства. Подробно описан алгоритм создания аналогового отпечатка; для наглядности алгоритм также представлен в виде блок-схемы. Рассмотрено применение алгоритма для целей опознавания датчиков в лабораторных условиях (с использованием специально созданного испытательного стенда).*

I. Введение

В последнее время количество инцидентов безопасности в автоматизированных системах неуклонно увеличивается; в частности, повышается вероятность осуществления злоумышленником (внутренним нарушителем) атаки подмены устройства нижнего уровня АС (датчика, счетчика) или его сигнала с целью дестабилизации работы системы. Для своевременного выявления злонамеренных действий необходимо каким-либо образом оценивать корректность данных, передаваемых такими устройствами. Существующие решения данной проблемы включают установку специализированного аппаратного обеспечения на шину передачи данных, а также опознавание устройств по каким-либо признакам, позволяющим выявить факт подмены.

В работах [1-6] рассматривается возможность опознавания устройства по его цифровому отпечатку (на основе динамической модели сигнала, нейросетевых моделей, гибридных имитационных моделей и т.д.). Для подобного подхода не нужна установка дополнительного оборудования, однако для эффективного опознавания требуются качественно собранные данные, особенно в части стабильности интервалов между измерениями. В реальности такая стабильность соблюдается далеко не всегда.

В данной работе предлагается проводить опознавание устройств нижнего уровня по их аналоговым отпечаткам (АО), то есть на основе измеренных параметров аналогового сигнала на технологической шине.

II. Описание алгоритма

Опознавание устройства с использованием аналогового отпечатка проводится в четыре основных этапа:

1. Путем анализа канального сигнала технологической шины выделяются параметры сигнала, потенциально пригодные для опознавания.
2. Среди выделенных параметров определяются существенно значимые для данной технологической системы параметры.
3. Строится набор эталонных аналоговых отпечатков всех устройств данной системы путем усреднения параметров аналогового сигнала с технологической шины по достаточному количеству измерений.
4. Собственно опознавание устройства заключается в сравнении его текущих параметров со всем набором эталонных моделей и определении эталонной модели, отличие от которой минимально.

Таким образом, становится возможным сравнивать эталонный АО с построенным по запросу в произвольный момент времени для выявления факта подмены устройства или его сигнала.

Первые три этапа (процедура построения аналогового отпечатка устройства) представлены в виде блок-схемы на рисунке 1.

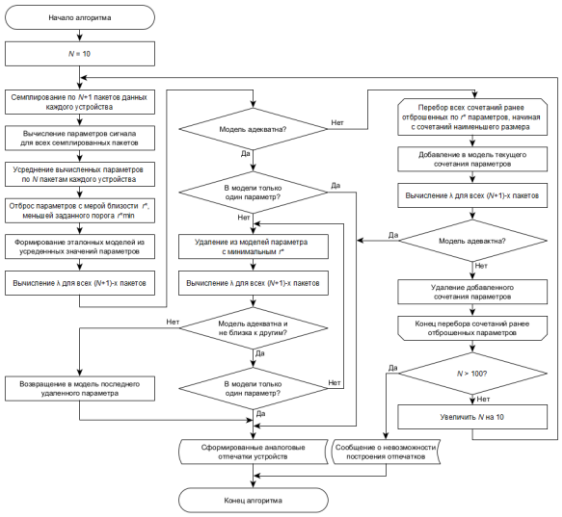


Рис.1. Алгоритм построения аналогового отпечатка устройства

III. Заключение

Для проверки работоспособности алгоритма был создан стенд, состоящий из 6 датчиков температуры и влажности (XY-MD01 и XY-MD03 (интерфейс RS-485 + протокол Modbus)), цифрового осциллографа HP 54825A, а также стационарного компьютера с подключенным адаптером USB – RS-485 (рисунок 2). Проведенный эксперимент показал, что точность опознавания устройств по аналоговому отпечатку, построенному по предлагаемому алгоритму, составила от 72 до 98%.

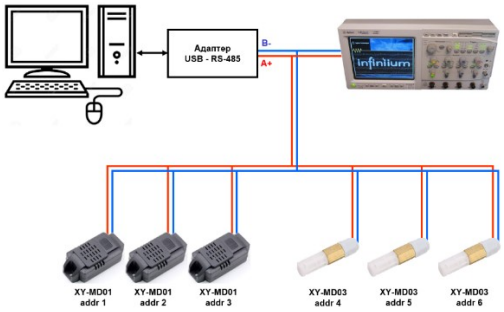


Рис.2. Схема стенда

Литература

[1] *Богачева Д.Н., Лукинова О.В., Рощин А.А.* The Approach to Recognition of Process Data Metering Devices Using Their Digital Fingerprints / *Proceedings of the 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. Sochi, Russian Federation: IEEE, 2025. С. 912-916.

[2] *Захарченко В.Е.* Контроль достоверности значений параметров в АСУ ТП // *Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов третьей всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2007*. Т.1. 2007. – СПб.: ФГУП ЦНИИТС. С. 278-286.

[3] *Захарченко В.Е.* Оценка достоверности информационного обеспечения АСУТП гидроагрегата на основе функционально-ориентированных нечетких математических моделей. – Самара: СГТУ. 2011.

[4] *Chowdhury R., Idris A., Abas P.* Device identification using optimized digital footprints. // *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*. - 2023. - № 12(1). - С. 232-240.

[5] *Kawoosa A.I., Prashar D., Anantha Raman G.R., et al.* Improving Electricity Theft Detection Using Electricity Information Collection System and Cus-tomers' Consumption Patterns. // *Energy Exploration & Exploitation*. - 2024. - № 42(5). - С. 1684-1714.

[6] *Ding N., Ma H., Gao H., Ma Y., Tan G.* Real-time anomaly detection based on long short-Term memory and Gaussian Mixture Model. // *Computers & Electrical Engineering*. - 2019. - № 79. - С. 106458.

К задаче моделирования визуально наблюдаемого виртуального пространства, синтезированного имитаторами авиационного тренажёра

В. Р. Роганов[1], Б. С. Долговесов[2], С. Хилал[1], Л. Н. Пепел[1], Р. А. Ишуков[1]

[1]Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия,
[2]Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия,

vladimir_roganov@mail.ru, bsd@mail.ru, sonya.nina.helal@gmail.com, l.pepelinbox@mail.ru, ishukov@mail.ru

Аннотация. *Появление на борту летательных аппаратов тепловизоров поставило задачу разработать имитаторы тепловизоров для авиационных тренажёров и тренажёров операторов беспилотных летательных аппаратов. Целью разработки имитаторов тепловизоров является обучение лётчиков и операторов беспилотных летательных аппаратов решению навигационных задач связанных с распознаванием 3D-моделей реперных объектов для определения места нахождения модели летательного аппарата и направления его полёта в виртуальном пространстве, образованном имитатором визуальной обстановки (синтезирующем в режиме реального времени 3D-модели реперных объектов в зрительном диапазоне электромагнитных волн) и имитатором тепловизора (синтезирующем в режиме реального времени 3D-модели реперных объектов в двух режимах: ИК-диапазон монохромный окрас и ИК-диапазон мультиспектральный окрас). Целью данной работы предложить один из методов совмещения в одной и тоё же точке виртуального пространства трёх 3D-моделей одного и того же реперного 3D-объекта наблюдаемых в разных диапазонах электромагнитных волн.*

I. Введение

Лётчик во время полёта на летательном аппарате (ЛА), или оператор беспилотного летательного аппарата (БПЛА) решают задачи двух классов [1]. Задачи первого класса – считать с приборов кабинного оборудования необходимую информацию и визуально ориентируясь по наблюдаемой за кабиной ЛА 3*D*-изображению внешней среды принять решение и воздействуя на органы управления ЛА или БПЛА направить траекторию их полёта в заданном направлении [2]. Второй класс задач решаемых лётчиком во время полёта ЛА – ориентируясь по информации от приборов радиотехнических средств самолётовождения расположенных в кабине (РТСс) и сверяя полученные показания по карте на которой отмечены наземные радиомаяки (РТСн) определить место нахождение ЛА и траекторию его полёта [3].

II. Материалы и методы

Тогда авиационные тренажёры (АТ) и тренажёры операторов БПЛА должны разрабатываться с целью формирования заданных составляющих когнитивных модели *i*-го лётчика $X_i^{(ЛА)}$ или *i*-го оператора БПЛА $X_i^{(БПЛА)}$ в которых откладывается приобретённый ими в течении всей жизни времени T_i затраченного на предполётную подготовку и время реальных полётов. Обозначим опыт профессионального управления ЛА или БПЛА (отложенный в составляющих их когнитивной модели) как $X_i^{(У,ЛА)}$ или $X_i^{(У,БПЛА)}$ и опыт решения задач самолётовождения (отложенный в составляющих их когнитивной модели) $X_i^{(Н,ЛА)}$ или $X_i^{(Н,БПЛА)}$. Если во время полёта на ЛА или при управлении оператором БПЛА у них формируются $X_i^{(У,ЛА)}$, $X_i^{(У,БПЛА)}$, $X_i^{(Н,ЛА)}$, $X_i^{(Н,БПЛА)}$ с профессиональными навыками качество которых зависит от особенностей конкретного человека и T_i, то во время полёта на АТ или на тренажёре подготовки

операторов БПЛА из-за невозможности создания полной модели как внешней среды, так и моделей синтезирующих в режиме реального времени информацию, обработав которую лётчик или операторов БПЛА приобретает не только полезные навыки $X_i^{(У,ЛА)'}$, $X_i^{(У,БПЛА)'}$, $X_i^{(Н,ЛА)'}$, $X_i^{(Н,БПЛА)'}$, но и так называемые ложные навыки $X_i^{(У,ЛА)''}$, $X_i^{(У,БПЛА)''}$, $X_i^{(Н,ЛА)''}$, $X_i^{(Н,БПЛА)''}$ [4]. Таким образом

$$X_i^{(У,ЛА)} = X_i^{(У,ЛА)'} \bigcup X_i^{(У,ЛА)''}, \quad (1)$$

$$X_i^{(У,БПЛА)} = X_i^{(У,БПЛА)'} \bigcup X_i^{(У,БПЛА)''}, \quad (2)$$

$$X_i^{(Н,ЛА)} = X_i^{(Н,ЛА)'} \bigcup X_i^{(Н,ЛА)''}, \quad (3)$$

$$X_i^{(Н,БПЛА)} = X_i^{(Н,БПЛА)'} \bigcup X_i^{(Н,БПЛА)''} \quad (4)$$

Тренажёры операторов БПЛА появились недавно, как и сами БПЛА [5]. В то время как первые АТ разработаны в XX веке [6] и к настоящему времени уже имеется достаточно материалов чтобы оценить их эффективность и определить направления их совершенствования [7].

Результаты исследований показали, что подавляющее число специализированных и комплексных АТ и тренажёров операторов БПЛА разработаны с целью обучения профессиональным навыкам пилотирования ЛА и БПЛА в ограниченном списке особых условии полёта, названных «учебными ситуациями» (УС) [8]. Причинами такого подхода к конструированию АТ и тренажёров операторов БПЛА являются:

1) требование Зайчика повысить $X_i^{(У,ЛА)'}$ за минимальное время без материального ущерба;

2) развитие науки и техники, что позволяло синтезировать за цикл режима реального времени информационные потоки от каждой модели всех узлов ЛА с минимальным отклонением от ожидаемого результата, что позволяет минимизировать $X_i^{(У,ЛА)''}$ при полёте на АТ или тренажёре подготовки операторов БПЛА в заданных УС;

3) требование Заказчика, чтобы при полётах на АТ имелась возможность обучать лётчика на обучение лётчика решению навигационных задач $X_i^{(У,ЛА)'}$ и $X_i^{(Н,ЛА)'}$ только при его полномасштабном обучении визуальной посадки на узнаваемую 3*D*-модель ВПП, что предполагает полёт на АТ в «сплошной облачности» с выходом из неё после четвёртого разворота – в этом случае досочно синтезировать на 3*D*-модели местности, размером не более чем 15×15 км 3*D*-модель ВПП и размещённые около неё 3*D*-модели реперных объектов, а на остальных участках полёта на АТ лётчик должен решать навигационные задачи по информации от РТСс и по подсказкам инструктора, так же как в реальном полёте лётчик имеет возможность отправив запрос «Полюс» получить в ответ координаты места нахождения ЛА;

4) некрещённые задачи компьютерного синтеза 3*D*-модели заданного Заказчиком района полётов размером не менее чем 400×400 км, что позволяет при подготовке тренировочных полётов на АТ решать задачи самолётовождения при полёте по заданному маршруту от одного поворотного пункта маршрута (ППМ) к другому и при этом иметь возможность определять место нахождение модели ЛА над 3*D*-модели заданного Заказчиком района полётов и направление траектории её полёта по информации от РТСс и уточняя эту информацию рассматривая 3*D*-модели реперных объектов в видимом диапазоне электромагнитных волн;

5) появление на борту ЛА или БПЛА тепловизоров дополнило число нерешённых задачам необходимостью синтезировать на заданном Заказчиком участке местности к 3*D*-модели района полётов для наблюдения в зрительном диапазоне электромагнитного излучения ещё одну 3*D*-модель района полётов для наблюдения в ИК-диапазоне (монохромный окрас) и вторую 3*D*-модели района полётов для наблюдения в ИК-диапазоне (мультиспектральный окрас) с

размещением на всех трёх полётов в одном и том же месте виртуального пространства 3*D*-моделей реперных объектов, которые видны как минимум в двух диапазонах электромагнитного излучения, что должно минимизировать;

6) неточность рекомендаций – какие 3*D*-объекты, размещённые на заданном Заказчиком районе полётов должны считаться реперными, с целью размещения их 3*D*-моделей в разрабатываемой 3*D*-модели района полётов.

Во всех случаях речь идёт о моделировании виртуальной среды составными частями которой являются:

1) 3*D*-модель района полётов для наблюдения в зрительном диапазоне электромагнитного излучения – привычный для лётчиков и операторов БПЛА (Рис.1);

2) 3*D*-модель района полётов для наблюдения в ИК-диапазоне (монохромный окрас) – привычный для лётчиков и операторов БПЛА, приближенный к чёрно-белому кино (Рис.2);

3) 3*D*-модель района полётов для наблюдения в ИК-диапазоне (мультиспектральный окрас) – отличительной особенностью которого является необходимость обучать лётчиков и операторов БПЛА распознаванию реперных объектов внешний вид которых (Рис.3) значительно отличающаяся от привычных изображений этого района (Рис.4).

Рис.1. Вариант 3*D*-модели ВПП с 3*D*-моделью прилегающей местности в зрительном диапазоне электромагнитного излучения

Рис.2. Вариант 3*D*-модели ВПП с 3*D*-моделью прилегающей местности в ИК-диапазоне (монохромный окрас)

Для синтеза необходимого изображения 3D-моделей реперных объектов в указанных диапазонах электромагнитного излучения целесообразно использовать программно-технические системы получившие название «компьютерные генераторы изображения», которые ранее представляли из себя мультипроцессорные системы объединяющие несколько компьютеров (что ограничивало из применение авиа тренажёростроительными фирмами), а после появления видеокарт Geforce для персональных компьютеров стали общедоступными.

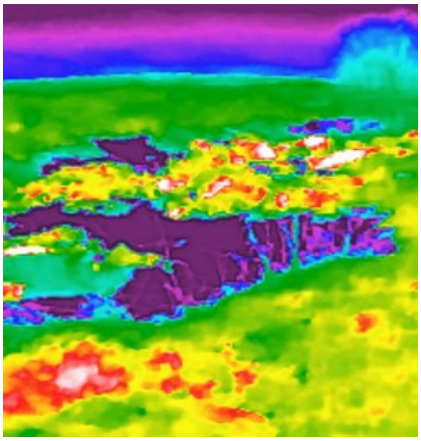


Рис.3. Вид участка местности в тепловизор (мультиспектральный окрас)

Рис.4. Вид этого же участка местности (Рис.3) в зрительном диапазоне электромагнитного излучения

III. Заключение

1. Исследования возможностей обучать лётчиков и операторов БПЛА показали, что для этого целесообразно разрабатывать тренажёры минимизирующие привитие ложных навыков при обучении решению задач пилотирования и задач самолётовождения в ограниченном наборе учебных ситуаций.

2. Как показали результаты исследований проведённых сотрудниками выполняющих работы в ИАиЭ СО РАН (при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 1023032300221-9-1.2.1) совместно с творческим коллективом проводившим исследования в области компьютерной графики [9,10], разработка предложенного варианта виртуального пристрастна стала возможным после применения видеокарт Geforce для персональных компьютеров, успешно заменившие разрабатываемые ранее компьютерные генераторы изображения состоявшие из нескольких компьютеров и синтезирующие в режиме реального времени 3*D*-модели реперных объектов заданного Закатчиком района полётов.

3. Ограниченная производительность компьютерных генераторов изображения, разработанных на традиционной и новой элементной базе не позволяет синтезировать все различимые 3*D*-объекты на заданном Заказчиком районе полётов, поэтому необходимо используя искусственный интеллект составить список реперных 3*D*-объектов, которые должны быть размещены на 3*D*-модели района полётов и на основании этого решить какой компьютерный генератор изображения выбрать для разрабатываемых тренажёров.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00445, https://rscf.ru/project/25-21-00445/

Литература

[1] *V.R. Roganov, M.Yu. Mikheev, B.S. Dolgovesov., E.A. Asmolova*, “Basic concepts of building modern software and hardware systems of aviation training simulators to solve the tasks of training pilots”, II *International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Conference Proceedings. Ekaterinburg,* 2024, pp. 2159-2170.

[2] *V. Roganov, B. Dolgovesov, E. Asmolova, M. Chetvergova*, “Analysis of directions for improvement of flight simulators”, *E3S Web of Conferences.* 2023, pp. 04037.

[3] *В.Р. Роганов, М.Ю. Михеев,* “Управление ресурсами специализированной системы синтеза изображения района полетов для авиационного тренажера”, *Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 3, с. 48-60.*

[4] *V.R. Roganov, M.Yu. Mikheev* “Resource Management of a Specialized Flight Area Image Synthesis System for an Aviation Simulator*”, Aerospace Instrumentation.* 2023. No. 3, pp. 48-60.

[5] *M. Sato*, “Robust gain-scheduled flight controller for an in-flight simulator” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2020. Vol. 56. № 3, pp. 2122-2135.

[6] *L. Lu, M. Jump, M. Jones, D. Yilmaz, M. Pavel,* “Comparison of simulator platform and flight tasks on adverse rotorcraft pilot coupling prediction”, *Annual Forum Proceedings - AHS International. Ser. "70th American Helicopter Society International Annual Forum* 2014" 2014, pp. 2407-2423.

[7] *W.S. Lee, M.S. Tai, D.H. Kim, S.W. Choi, D.H. Park*, “Construction and evaluation of aerodynamic database for uam flight simulator integrationpart I: lift-cruise type*”, Journal of Computational Fluids Engineering.* 2024. Vol. 29. No 3, pp. 60-79.

[8] *V.R Roganov*, “*Methods and means for forming elements of a cognitive model of a human observing 3D models synthesized by aircraft simulator simulators”*. Industrial ACS and Controllers. 2022. No. 12, pp. 32-39.

[9] *В.Р. Роганов, “*Метод решения в машинной графике задачи взаимозакрываемости 3D-моделей при подвижном наблюдателе”. *НИР. Грант № 23-21-10046*. Российский научный фонд. 2023

[10] *В.Р. Роганов, “* Метод решения в машинной графике задачи взаимозакрываемости 3D-моделей при подвижном наблюдателе”. *Отчёт о НИР. № 23-21-10046*. Российский научный фонд. 2023.

LMI conditions for parameters of one robust control algorithm

A. V. Imangazieva
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia,
aliya111@yandex.ru

***Abstract**. A robust algorithm for controlling a linear dynamic plant subject to external uncontrolled disturbances under conditions of parametric uncertainty of the plant model is considered. The control action is formed on the basis of the auxiliary loop method using observers of the system variables. The structure of the regulator is such that it allows first to form a special signal carrying information about external perturbations and parameter perturbations, and then to compensate its negative effect on the whole system. The input and output of the control system are scalar quantities. In this paper, we propose a new procedure for finding the parameters of the considered algorithm, based on the technique of linear matrix inequalities LMI. The search procedure is based on the requirement to the closed-loop system of stability property, formulated in the form of existence of Lyapunov function. The conditions for the closed-loop system in the form of linear matrix inequalities are obtained, which are solved with the help of program packages, for example, the YALMIP package of MATLAB environment.*

I. Introduction

The problems of regulator synthesis and state estimation taking into account uncertainty in the plant model and characteristics of input influences are among the central ones in modern control theory [1–4]. To date, quite a lot of results have been obtained with the help of modern approaches and methods of controlling plants of various degrees of completeness of information about their models. However, there are problems for which solutions have not yet been obtained in the general case, or require development using more modern techniques. One of the modern tools for solving control problems is the technique of linear matrix inequalities [4].

This paper considers a robust control algorithm for a linear dynamic plant subject to external uncontrolled perturbations under the parametric uncertainty of the plant model. The control action is formed on the basis of the auxiliary loop method using observers of the system variables. The structure of the controller is such that it allows first to form a special signal carrying information about external perturbations and parameter perturbations, and then to compensate its negative influence on the whole system. The input and output of the control system are scalar quantities. In this paper, we propose a new parameter search procedure for the considered algorithm based on the LMI linear matrix inequalities technique. The search procedure is based on the requirement to the closed-loop system of the stability property formulated in the form of the existence of the Lyapunov function. The conditions for the closed system are obtained in the form of linear matrix inequalities, which are solved using software packages such as YALMIP MATLAB [5].

II. Problem statement

Consider a plant model in the form:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Df(t), \qquad y = Lx(t), \tag{1}$$

$x \in R^n -$ state vector, $y \in R -$ regular variable $, u \in R -$control variable, $A, B, D -$ set of constant numerical matrices,$L = [1\ 0\ \ldots 0]$.

The required quality of transients in the plant is given by the reference model equation

$$Q_m(p)y_m(t) = k_m g(t), \tag{2}$$

where $g(t) -$ tuning effect , $k_m > 0$, $y_m -$ scalar output of the reference model, $\deg Q_m = n - m$.

It is required to obtain control algorithm [6] that ensure fulfillment of the following target conditions

$$|Y - y_m| < \delta, \quad t \geq T_0 \tag{3}$$

where $\delta -$ some sufficiently small number, $T_0 -$ time from which the target condition should be fulfilled after the system starts functioning.

III. Conclusion

A novel procedure for finding the parameters of one robust algorithm based on the technique of linear matrix inequalities LMI is proposed. The search procedure is based on the requirement to the closed-loop system of the stability property formulated in the form of the existence of the Lyapunov function. The conditions for the closed-loop system in the form of linear matrix inequalities are obtained, which are solved with the help of program packages, for example, the YALMIP package of MATLAB environment.

References

[1] *H. K. Khalil. Nonlinear Control.* London: Pearson, 2015, 304 p.

[2] *A.M. Annaswamy, A.L. Fradkov*, "A Historical Perspective of Adaptive Control and Learning". Annu. Rev. Control. 2021, 52, pp. 18-41.

[3] *A.M. Tsykunov. Robust control with aftereffect.* 2014, Fizmatlit, Moscow, 264 p.

[4] B*.T. Polyak, B.T., M.V. Khlebnikov, M.V., P.S. Shcherbakov,* "Linear matrix inequalities in control systems with uncertainty". *Automation and Remote Control,* 2021, 82(1), pp.1-40.

[5] *P.Gahinet, A.Nemirovski, A.J. Laub, M. Chilali. The LMI Control Toolbox.* 1995, Natick, MA: The MathWorks, inc.

[6] *A. V. Imangazieva, A. M. Tsykunov* . "The robust control of a linear dynamic system". Vestnik of the Astrakhan State Technical University, 2007, 1(36), pp. 19-25.

Автоматическое определение положения долота при бурении горизонтальных скважин с помощью алгоритма RVM

И. А. Щербаков, О. Н. Кочуева
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия,
ylyxa000@gmail.com, olgakoch@mail.ru

***Аннотация**. Во время бурения горизонтальных нефтяных скважин необходимо с высокой точностью определять положение долота в пространстве. Традиционно геонавигацию осуществляли эксперты, контролируя множество параметров, в последние десять лет начали появляться системы, способные осуществлять геонавигацию автоматически. В данной статье для целей одной из подзадач автоматической геонавигации -- определения стратиграфического положения долота относительно пласта -- применены традиционный метод опорных векторов (SVM) и метод релевантных векторов (RVM), использующий при обучении процесс автоматического определения релевантности (ARD), рассмотрены их преимущества и недостатки. Оба алгоритма были протестированы в процессе решения задачи бинарной классификации – определения, соответствуют показания датчиков в данный момент времени целевому интервалу или отрезку вне целевого интервала. Показано, что алгоритм RVM в процессе предсказания показывает не уступающие по метрикам точности алгоритму SVM результаты, в то же время задействуя намного меньше векторов. Это означает снижение количества вычислений функции ядра, что в перспективе дает значительное снижение вычислительной сложности предсказания, особенно если сама функция ядра имеет высокую вычислительную сложность. Это имеет важное значение для сопровождения буровых работ и других практических задач.*

I. Введение

В процессе бурения скважин генерируется большой объем данных о структуре пласта, в том числе и в режиме реального времени. Традиционно, решения в геонавигации принимались с помощью экспертной оценки, часто полагаясь на ручную интерпретацию данных, полученных во время бурения. Человек не в состоянии за короткое время обработать объем информации, получаемый в процессе бурения скважин, из-за чего весомая часть этих данных при ручной геонавигации не используется. При проведении каротажа в процессе бурения (Logging While Drilling, LWD) геофизические приборы располагаются внизу бурильной колонны над долотом на достаточно большом расстоянии от него (до 25 м). Любое изменение геологической обстановки может быть зарегистрировано и, как следствие, интерпретировано только после его непосредственного пересечения, поэтому время на интерпретацию при LWD критически важно.

II. Теоретическая основа

В России разработки в области геонавигации начались в конце XX века [1], после того, как получили распространение технологии горизонтального бурения. Примерно 10 лет назад начали проводиться исследования в области автоматической геонавигации [2]. Под автоматизацией геонавигации подразумевается автоматический анализ данных, полученных во время бурения: сопоставление каротажных кривых [3], определение стратиграфического положения долота, обнаружение внештатных ситуаций [4] и т.п.

Одной из целей геонавигации является определение стратиграфического положения долота, точнее, находится оно в целевом интервале или нет. В случае, если долото вышло из целевого интервала, траектория бурения меняется, чтобы вернуть долото в целевой интервал. С этой целью большое количество исследований велось в области мониторинга бурения [5],[6].

Рассматриваемую в данной работе задачу определения стратиграфического положения долота можно решать как двухуровневую: на первом уровне необходимо принять решение о выборе опорной скважины, данные каротажа которой будут впоследствии применены для решения второй задачи - определения, находится ли долото в целевом интервале. Задача верхнего

уровня также является классификационной, так как из заранее определенных скважин (обычно 3-х), необходимо выбрать опорную, причем в процессе бурения выбор может измениться.

Метод релевантных векторов (Relevance Vector Machine, RVM) [7] был разработан как альтернатива распространенному методу опорных векторов (Support Vector Machine, SVM). Метод, по сути, вводит априорное распределение на вектор гиперпараметров. Разреженность достигается за счет того, что апостериорные вероятности подавляющего большинства весов равны нулю. Особенностью RVM является то, что ненулевые веса в получившейся модели не связаны с элементами, близкими к границе между

классами (decision boundary), а представляют собой некие «прототипы» элементов классов. У RVM есть ряд преимуществ по сравнению с SVM, в частности:

- В классификации способность определять вероятность принадлежности объекта к каждому классу
- Отсутствие необходимости оптимизации гиперпараметров (кроме связанных с функцией ядра)
- Отсутствие необходимости использовать функцию ядра, удовлетворяющую теореме Мерсера.

III. Сравнительный анализ работы алгоритмов SVM и RVM

Для сравнения работы алгоритмов была поставлена следующая задача бинарной классификации: на основе данных геофизических исследований, полученных во время бурения, обучить модель и оценить ее точность и быстродействие. Для этого были взяты данные различных каротажей, в данном случае – гамма-каротаж (ГК, пример на рис. 1 слева) и каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС, пример на рис. 1 справа) со скважин с размеченным в них целевым интервалом. То есть, данные разбиты на два класса – «целевой интервал» и «участки вне целевого интервала». Характеристики и метрики полученных моделей приведены в таблице 1.

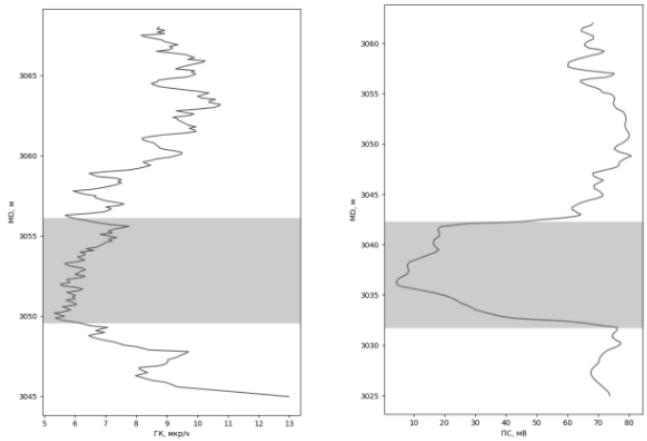


Рис.1. Примеры ГК и ПС

Характеристики и метрики полученных моделей приведены в таблице 1.

Очень малое количество векторов при использовании алгоритма RVM означает малое количество вычислений функции ядра, что дает значительный прирост быстродействия при предсказывании, особенно если сама функция ядра трудновычислима. Более того, при обучении SVM необходимо оптимизировать параметр штрафа, для чего обычно необходима процедура кросс-валидации. Это увеличивает вычислительную сложность алгоритма.

Таблица 1. Результаты тестирования

	Время обучения, с	*Кол-во векторов*	*F-мера*
SVM	0.001	116	0.909
RVM	23	4	0.913

IV. Заключение

В данной работе представлены модели для автоматического определения положения долота с помощью метода опорных векторов (SVM) и метода релевантных векторов (RVM). Проведен сравнительный анализ точности и быстродействия методов, в результате которого было показано, что хотя RVM показывает более высокую вычислительную сложность обучения, чем SVM, в процессе предсказания он использует намного меньше векторов, что означает меньшее количество вычислений функции ядра (а значит, меньшую вычислительную сложность предсказания). Вычислительная сложность обучения не так важна для геонавигации, так как модель для каждой опорной скважины обучается до бурения фактической скважины.

Литература

[1] *В. Кульчицкий*, “Геонавигация горизонтальных скважин”, *Нефтяное Хозяйство*, 2020, №1166, С. 91-95

[2] *А. Билинчук и др.,* “Автоматизация процесса петрофизической интерпретации как элемент эффективной геонавигации”, *Нефтяное Хозяйство*, 2016, №622, С. 36-39

[3] *M. Ali и др.,* “Machine learning - A novel approach of well logs similarity based on synchronization measures to predict shear sonic logs”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, №203,

[4] *Е. Гурина и др.,* “Application of machine learning to accidents detection at directional drilling”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, №184

[5] *S. Brazell, A. Bayeh, M. Ashby, D. Burton*, “A machine-learning-based approach to assistive well-log correlation”, Petrophysics - *The SPWLA Journal*, 2019, №60, С. 469-479

[6] *L. Xing и др.,* “The First Real Time Reservoir Characterization, Well Placement and RSS Applications in Shale Gas Horizontal Well Play in Central China - A Case Study”, ADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 07.2012

[7] *M. Tipping*, “The Relevance Vector Machine”, Microsoft Research, 1999

Синтез алгоритмов управления для модели вертолета на основе линейных и нелинейных методов

С. А. Кочетков, Д. А. Нефедов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
kos@ipu.ru, dangoodds@gmail.com

Аннотация. *В статье представлен подход к синтезу нелинейных алгоритмов управления для модели вертолета. На основе уравнений Лагранжа второго рода выведены механические уравнения системы, учитывающие аэродинамические сопротивления лопастей и фюзеляжа. Была решена задача построения алгоритма управления, стабилизирующего вертолет на земле с заданным угловым положением относительно вертикальной оси. Предложенный закон управления учитывает динамические ограничения, связанные с физической моделью вертолета. В работе также были рассмотрены алгоритмы управления, полученные на основе линеаризации механической системы.*

Современные модели вертолетов требуют учета сложных нелинейных связей, возникающих при анализе полной динамики системы, включающей динамику как самого вертолета, так и внешних возмущений, например, аэродинамических сопротивлений [1]. Зачастую используются методы синтеза алгоритмов управления на основе линеаризации механической системы.

Для решения поставленной задачи необходимо сперва получить механические уравнения системы. За основу была взята модель вертолета, представленная на рисунке 1.

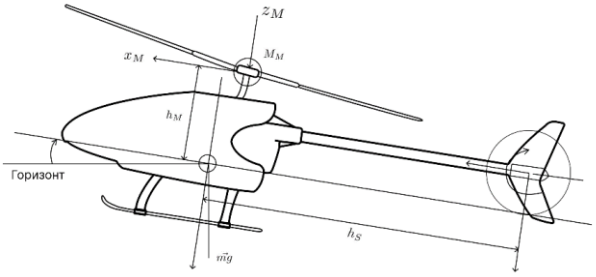


Рис. 1. Модель вертолета

Динамическая система была получена с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода. Перед представлением полученной системы, введем некоторые обозначения. Пусть M_{F_T}, M_{F_S} - моменты, создаваемые тягой основного и побочного винтов:

$$M_{F_T} = f_1\omega_M^2 h_M(\sin\alpha, \sin\beta, 0)^T, M_{F_S} = e_3 h_S f_2 \omega_S^2, \quad (1)$$

где h_M - расстояние от центра масс вертолета до диска основного винта, а h_S - расстояние от центра масс вертолета до оси вращения побочного винта, ω_M, ω_S - угловые скорости основного и побочного винтов, α, β - углы наклона крена и тангажа диска основного винта.

Определим матрицу поворота из неподвижной системы координат в подвижную:

$$R_{XYZ} = R = \begin{pmatrix} c_{\psi_B}c_{\vartheta_B} & c_{\psi_B}s_{\vartheta_B}s_{\phi_B} - s_{\psi_B}c_{\phi_B} & c_{\psi_B}s_{\vartheta_B}c_{\phi_B} + s_{\psi_B}s_{\phi_B} \\ s_{\psi_B}c_{\vartheta_B} & s_{\psi_B}s_{\vartheta_B}s_{\phi_B} + c_{\psi_B}c_{\phi_B} & s_{\psi_B}s_{\vartheta_B}c_{\phi_B} - c_{\psi_B}s_{\phi_B} \\ -s_{\vartheta_B} & c_{\vartheta_B}s_{\phi_B} & c_{\vartheta_B}c_{\phi_B} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\varphi_B, \psi_B, \vartheta_B$ - углы поворота вертолета относительно исходного состояния, $s_{\varphi_B}, c_{\varphi_B}, s_{\psi_B}, c_{\psi_B}, s_{\vartheta_B}, c_{\vartheta_B}$ - синусы и косинусы углов $\varphi_B, \psi_B, \vartheta_B$ соответственно. Определим также матрицу оператора векторного произведения на вектор угловых скоростей [3]:

$$S(\omega_B) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ - угловые скорости фюзеляжа относительно осей подвижной системы координат, связанной с вертолетом.

С учетом указанных обозначений динамическая система уравнений вертолета принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{r} = Rv, \\ m\dot{v} = -mS(\omega_B)v - mgR^T e_3 + \Theta f_1 \omega_M^2 e_3 + f_2 \omega_S^2 e_2 + R^T R^e, \\ \omega_B = \Gamma \dot{\gamma}_B, \\ \dot{R} = RS(\omega_B), \\ J\dot{\omega}_B = -S(\omega_B)J\omega_B - \Theta J_M e_3 \dot{\omega}_M - J_S e_2 \dot{\omega}_S + M_{F_T} + M_{F_S} + M_M + M_S + M^e, \end{cases} \tag{4}$$

где $\Gamma = \begin{pmatrix} 1 & -\sin\vartheta_B & 0 \\ 0 & \cos\vartheta_B \sin\varphi_B & \cos\varphi_B \\ 0 & \cos\vartheta_B \cos\varphi_B & -\sin\varphi_B \end{pmatrix}$ - матрица связи производных углов Эйлера с угловыми скоростями вертолета [2], r - радиус-вектор положения вертолета в пространстве, v - скорость, m - масса, ω_B - угловая скорость вертолета и побочного винта, f_1, f_2 - силовые коэффициенты, J - тензор инерции, M_M, M_S - моменты сил сопротивления в основном и побочном винтах, M^e - суммарный момент всех внешних сил

В работе рассматривается задача стабилизации вертолета на земле. При посадке важно, чтобы кроме вертикального положения были также зафиксированы углы крена и тангажа, то есть вертолет ровно садился на поверхность. Перечисленные условия можно выразить следующим образом:

$$\begin{gathered} z \to 0, v \to 0, \\ \vartheta, \phi \to 0, \psi \to \psi^*, \omega_B \to 0 \end{gathered} \tag{5}$$

В качестве переменных управления рассматриваются угловая квазискорость и углы поворота диска основного винта. В результате был синтезирован следующий алгоритм управления:

$$\begin{gathered} \omega_M = \sqrt[4]{\frac{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) + \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 - 4u_2^2 u_3^2}}{2}}, \\ \alpha = arcsin\left(\frac{u_2}{\omega_M^2}\right), \\ \beta = arcsin\left(\frac{u_3}{\omega_M^2}\right), \end{gathered} \tag{6}$$

где $u_1 = K_{11}z + K_{12}v_z - F_z^e, u_2 = K_{21}\varphi + K_{22}\omega_x - M_x, u_3 = K_{31}\vartheta + K_{32}\omega_y - M_y^e$. С помощью полученного управление достигается поставленная цель задачи.

Результаты моделирования динамической системы (4) демонстрируют высокую точность и эффективность построенных законов управления для стабилизации вертолета.

Литература

[1] *S.A. Kochetkov, S.A. Krasnova, V.A. Utkin* “Robust Control for Synchronous Electric Drive Under Uncertainty Conditions”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2046, issue 1, 2018, pp. 1-8.

[2] *А.И. Лурье* «Аналитическая механика». - М.: Государственной издательство физико-математической литературы, 1961. - 824 с.

[3] *M.D. Hua* “Contributions to the automatic control of aerial vehicles” [Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis], HAL Open Science, 2009, *https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00460801v1*

Разработка силового блока управления нагрузочным генератором экспериментальной установки для исследования колебаний судового валопровода

Г. А. Кушнер, К. А. Климкин, Н. А. Иванков, Н. Г. Романенко
Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,
guriy.kushner@mail.ru

***Аннотация**. Работа посвящена модернизации экспериментальной установки для обеспечения исследовательских работ в области динамики и надежности судовых валопроводов. Необходимость разработки подтверждается опытом эксплуатации судовых энергетических установок, где параметры колебаний валопровода напрямую связаны с показателями надежности системы. В работе приведена конструкция экспериментальной установки, позволяющей исследовать парциальные колебания и их комбинации. Решена задача возбуждения крутильных колебаний путем генерации импульсного вращающего момента. Приведена схема генератора, вырабатывающая колебания прямоугольной формы с силовым блоком управления. В дополнении к этому, конструкция экспериментальной установки позволяет исследовать поперечные и осевые колебания вала. Практическая значимость разработки обусловлена возможностью дальнейших исследований колебаний в расширенном диапазоне варьирования факторов. Результаты исследований могут быть распространены на валопроводы натурных судов с целью повышения их эксплуатационной надежности.*

I. Введение

Судовой валопровод представляет собой упругую систему, работающую в условиях разнонаправленных динамических нагрузок, в которой возникают поперечные, крутильные и осевые колебания. Изучению динамики валопроводов в условиях парциальных колебаний посвящено существенное количество научных работ [1-5], и лишь малая часть исследований посвящена рассмотрению колебаний неизолированно друг от друга [6-8].

Проведение многофакторных испытаний парциальных и связанных колебаний на валопроводах натурных судов является трудоемким и дорогостоящим мероприятием, существенно упростить которое можно постройкой экспериментальной установки, работа которой максимально приближена к реальным условиям.

II. Конструкция экспериментальной установки

Проектирование экспериментальной установки для исследования парциальных поперечных, крутильных, осевых и связанных колебаний является технической задачей, решение которой позволит расширить диапазон исследований динамических явлений, происходящих в судовом валопроводе и получить массив экспериментальных данных для последующей обработки и интерпретации.

Конструкция установки приведена на рисунке 1. Установка состоит из двух электрических машин, соединённых между собой клиноременной передачей. С одной из машин, которая является асинхронным двигателем, жестко закреплен вал, на котором закреплены тензодатчики и установлен диск (маховик). Для исследования крутильных колебаний валопровода одна электрическая машина работает в двигательном режиме, вращая маховик, а другая – в генераторном и тормозит его вращение.

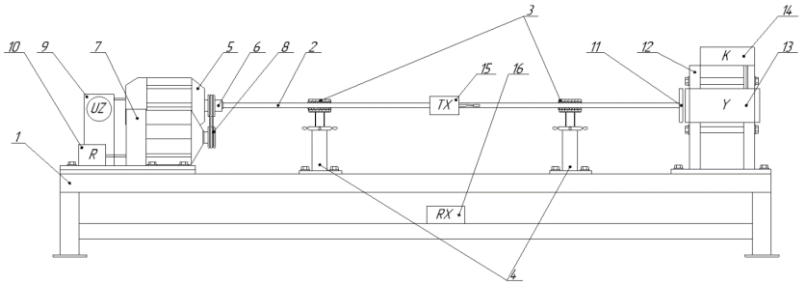


Рис.1. Общий вид установки для исследования колебаний судового валопровода:
1 – металлическая рама; 2 – вал; 3 – подшипники скольжения; 4 – опоры подшипников;
5 – асинхронный двигатель; 6 – муфта втулочная; 7 – генератор;
8 – двухручьевая клиноременная передача; 9 – частотный преобразователь;
10 – нагрузочный генератор и силовой блок; 11 – металлический диск;
12 – опора нагрузочного узла; 13 – электромагнит; 14 – блок управления
электромагнитом; 15 – роторная часть устройства регистрации колебаний;
16 – статорная часть устройства регистрации колебаний

Для исследования параметров крутильных колебаний валопровода необходимо создавать импульсный вращающий момент с регулируемыми параметрами: амплитудой, частотой, скважностью, а также регулируемый тормозной момент. Момент, создаваемый электрической машиной, зависит от тока в якорной обмотке и тока возбуждения. Необходимый частотный диапазон пульсаций вращающего момента можно обеспечить воздействием на ток якорной обмотки, т.к. величина постоянной времени обмотки возбуждения гораздо больше, чем якорной обмотки. Тормозной момент нагрузочного генератора задаётся изменением тока якорной обмотки генератора, т.к. генератор может вращаться при пониженной скорости, что приводит к малым значениям ЭДС якорной обмотки даже при номинальном магнитном потоке обмотки возбуждения, т.е. токе возбуждения генератора. Эти изменения токов якорных обмоток обеспечивает силовой блок управления с электронным генератором с изменяемой частотой, амплитудой и скважностью импульсов.

Разработанная конструкция экспериментальной установки позволяет исследовать как крутильные, так поперечные и осевые колебания вала, а также их комбинации. Варьируемыми факторами при проведении экспериментальных исследований за счёт особенностей конструкции являются: частота вращения вала, параметры импульсного вращающего момента, параметры материалов подшипников скольжения и зазоры в них, параметры центровки вала, расстояние между подшипниками, материал и диаметр вала, величину и частоту усилия осевого нагрузочного узла, а также их комбинации.

III. Блок управления нагрузочным генератором

На рисунке 2 приведена схема генератора, вырабатывающая колебания прямоугольной формы с силовым блоком управления на транзисторе VT4. Его основу составляет мультивибратор на транзисторах Т1 и Т2 серии КТ315 с регулируемой частотой и скважностью импульсов. Частота колебаний устанавливается переменным резистором R2, а скважность импульсов - от 0,2 до 10 - переменным резистором R4. Уровень выходного сигнала генератора от 0 до 4,5В регулируется переменным резистором R7. При ёмкости конденсаторов С1 и С2 равном 4,7мкФ, частота генерации может изменяться от 5 до 20 Гц. Питание схемы генератора и транзистора Т3 осуществляется от внешнего блока питания (Uп) напряжением + 8В. Для увеличения частоты генерации до 40 Гц необходимо уменьшить ёмкость конденсаторов С1 и С2 в 2 раза.

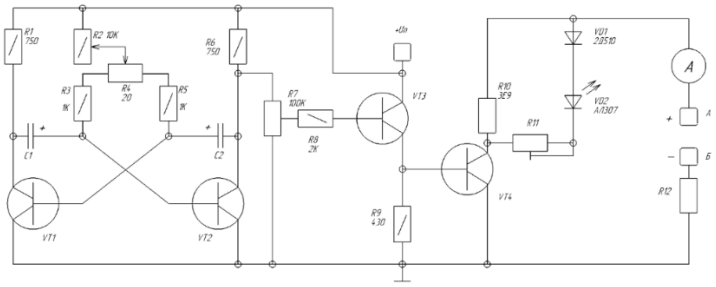


Рис.2. Принципиальная схема генератора прямоугольных импульсов
с изменяемой скважностью, частотой и амплитудой, и силовым ключом
на транзисторе VT4

Для улучшения согласования выходного сопротивления генератора с силовым транзисторным ключом на транзисторе Т4, в схему генератора включён дополнительный слаботочный ключ на транзисторе Т3 типа КТ315А, который напрямую управляет силовым ключом Т4. Транзистор Т4 типа КТ812 представляет собой мощный элемент управления цепи нагрузочного генератора и рассчитан на максимальный ток коллектора до 8А, при этом импульсное напряжение коллектор-эмиттер при соответствующих параметрах импульса не должно превышать 700 В. Этот транзистор установлен на радиаторе с площадью охлаждающей поверхности 300 см^{2,} так как при работе может нагреваться до +70º С.

На рисунке 3 показан пример выходного напряжения генератора в точке соединения эмиттера VT3 и резистора R9 при разных значениях скважности Q = T / $t_{и:}$ для левого графика Q=2, для правого Q=1,5.

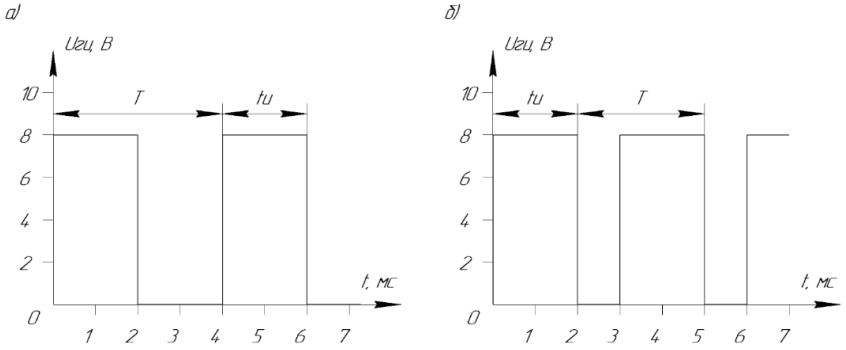


Рис.3. Выходное напряжение электронного генератора:
а – при скважности Q=2; б – при скважности Q=1,5

В данной схеме предусмотрена индикация номинального тока нагрузки в цепи нагрузочного генератора, которая реализована на элементах R10, R11, VD1, VD2. При этом, подстроечным резистором R11 можно выставить необходимый уровень. Элементом индикации является светодиод VD2, который начинает мигать с частотой генерации при токе в цепи нагрузочного генератора порядка 2А. Также в цепь генератора включён амперметр, который показывает среднее значение тока в цепи.

Нагрузочный генератор подключается к клеммам А и Б с соответствующим указанием полярности подключения. Резистор R12 является дополнительным токоограничивающим элементом в цепи нагрузочного генератора и при определённых условиях практического применения экспериментальной установки может быть исключён.

IV. Заключение

Предложенная конструкция экспериментальной установки позволяет расширить диапазон исследований колебаний судовых валопроводов. Полученные экспериментальные данные позволят установить зависимости для прогнозирования динамических свойств натурных валопроводов на основе качественно новых явлений.

Литература

[1] *Мартьянов В. В.* Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118 // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – С. 359-368.

[2] *Сутырин В. И.*, *Шинкаренко И. А.* Расчет крутильных колебаний судового валопровода буксира проекта 1606 // *Известия КГТУ*. – 2018. – №. 49. – С. 265-277.

[3] *Миронов А. И.* Поперечные колебания гребного вала при его одностороннем взаимодействии с дейдвудным подшипником // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. – 2012. – №. 2. – С. 26-34.

[4] Патент на полезную модель № 183445 U1 Российская Федерация, МПК G01H 17/00, G01M 7/02. устройство для исследования поперечных колебаний валопроводов судов: № 2018105992 : заявл. 16.02.2018: опубл. 24.09.2018 / *А. И. Миронов, А. Ю. Кукарина, В. А. Чанчиков*; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный технический университет", ФГБОУ ВО "АГТУ". – EDN OYQPNN.

[5] *Румб В. К., Хоанг В. Т., Серов А. В.* Современный взгляд на осевые колебания валопроводов судовых пропульсивных установок // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. – 2017. – №. 46-47. – С. 82-86.

[6] *Румб В.К., Самсонов А.В.* Расчет связанных крутильно-осевых колебаний валопроводов судовых дизельных установок методом главных координат // *Труды НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова*. – 2003. – №. 1(1). – С. 61-64.

[7] *Румб В.К., Самсонов А.В.* Гребной винт – источник упругой связи крутильных и осевых колебаний судового валопровода // *Труды НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова*. – 2003. – №. 1(1). – С. 58-61.

[8] *Кушнер Г. А.* Исследование связанных колебаний гребного вала экспериментального судна // *Труды Крыловского государственного научного центра*. – 2023. – №. 4 (406). – С. 109-118.

Моделирование рабочего колеса микротурбины для струйно-мембранной системы управления колесным транспортным средством

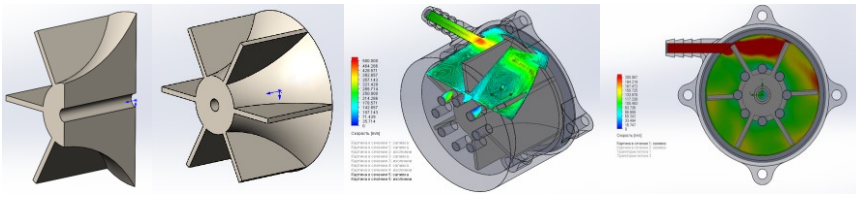
А. А. Кваша
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
kvashaandrey22@gmail.com

***Аннотация**. В статье представлены результаты исследования рабочих колес реверсивной микротурбины с использованием методов компьютерного и физического моделирования. Описаны различные конструктивные решения: колесо без покрывного диска, вариант с уменьшенной осевой длиной и колесо с гиперболоидным основанием. Приведены визуальные материалы, демонстрирующие характер течения рабочего тела и пространственное распределение скорости потока, выявляющие участки низкой эффективности рабочего объема. Рассматриваемая микротурбина применяется в качестве силового агрегата колесных транспортных средств, работающих в сложных эксплуатационных условиях, включая воздействия высокой и низкой температур, сильных электромагнитных полей и радиации.*

I. Введение

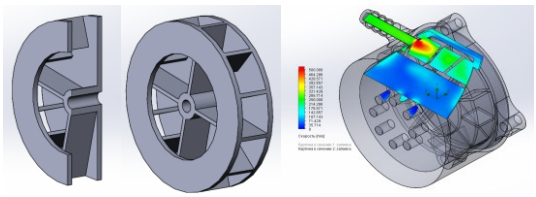
Струйно-мембранная элементная база применяется для построения цифровых и комбинированных систем управления объектами повышенной надежности, таких как летательные аппараты, атомные станции, оборудование для непрерывных и особо ответственных технологических процессов [1-4]. Примером такого оборудования может быть радиационно-стойкий робот, в котором используется микротурбина в качестве привода для его перемещения. Компьютерное моделирование рабочей среды микротурбин совместно с экспериментальной проверкой полученных результатов обеспечивает создание достоверных расчетных моделей, точно воспроизводящих реальные физические явления. Благодаря комплексному автоматизированному исследованию большого числа конструктивных решений определяются оптимальные рабочие характеристики работы микротурбин, выявляются ключевые закономерности и взаимосвязи между входящими и выходящими физическими величинами, что впоследствии можно применять для расчета более сложных технических систем.

II. Результаты компьютерного и физического моделирования рабочего колеса



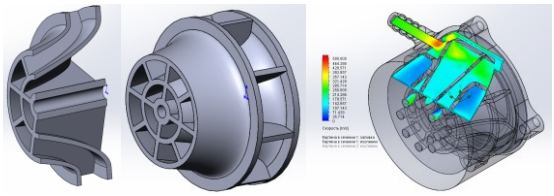
а) б)

Рис. 1. а) колесо с гиперболоидным основанием; б) эпюра скорости потоков воздуха



а) б)

Рис. 2. а) радиальное колесо с уменьшенными лопатками;
б) эпюра скорости потоков воздуха



а) б)

Рис. 3. а) колесо с покрывным диском, гиперболоидным основанием и увеличенным размером части лопатки для набегающей струи воздушного потока;
б) эпюра скорости потоков воздуха

а) б)

Рис. 4. Физическая модель: а) крыльчатки из рис.3.;
б) крыльчатки из рис.1

Данные конструкции были получены после исследования конструкции, представленной в статье [5]. Демонстрация эпюр скоростей компьютерного моделирования, отражает взаимодействие рабочего тела с лопатками рабочего колеса. На данных моделях отражены области, в которых потоки воздуха имеют минимальные и максимальные скорости. Подготовлены физические модели для исследования энергетических характеристик.

III. Заключение

В результате проведенных исследований построены компьютерные модели возможных вариантов конструкции рабочего колеса для микротурбины колесного транспортного средства со струйно-мембранной системой управления. При помощи полученных моделей вычислен градиент скорости энергоносителя (воздуха) при его взаимодействии с рабочими лопатками. На основе результатов вычисления градиента скорости выбран лучший вариант конструкции рабочего колеса, для которого создана физическая модель методом 3D-печати.

Литература

[1] *Балабанов А.В., Касимов А.М.* Экспериментальное исследование статических характеристик микроструйного триггера / *Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Материалы XV Международной конференции* (3 – 5 июня 2020 г., Москва) / [Ред. В. Н. Тхай]. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 59-62.

[2] *Балабанов А.В., Касимов А.М.* Разработка устройств струйной техники на основе многомерных сетей / *Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Материалы XV Международной конференции* (3 – 5 июня 2020 г., Москва) / [Ред. В. Н. Тхай]. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 62-65.

[3] *Касимов А.М., Балабанов А.В*. Метод разработки микроструйных функциональных узлов робастных резервных систем управления критическими объектами / *Материалы 26-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем»* (ПУБСС'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. – С. 284-288.

[4] *Балабанов А.В., Безменов В.С., Мамонтова А.А., Сухоруков А.А.* Командное устройство систем управления радиационностойких роботов на струйно-мембранной элементной базе // *Датчики и системы*. 2022. № 4. С. 42-46.

[5] *Кваша А.А., Артамонов А.Е.* Моделирование микротурбины для струйно-мембранной системы управления колесным транспортным средством / *Труды 19-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами»* (УБС’2023, Воронеж). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет, 2023. С. 295-301.

Идентификация дефектов технологических объектов управления с использованием методов искусственного интеллекта

Н. Г. Герасимов[1], О. М. Проталинский[2]

[1]АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» (АО «НИКИЭТ»), г. Москва, Россия,

[2]ООО «Производственно-коммерческая фирма «Бест Софт» (ООО «ПКФ «Бест Софт»), г. Астрахань, Россия,

protalinskiy@gmail.com, niggerasimov@rosatom.ru

Аннотация. *В статье рассмотрены аспекты применения аппарата искусственного интеллекта для решения задач параметрической диагностики дефектов технологических объектов управления на основе теории распознавания образов. Формулируется принцип идентификации дефектов технологического оборудования по их параметрическому образу, выраженному совокупностью характерных отклонений значимых технологических параметров. Обосновывается применение нечетких продукционных систем типа FIS в качестве основы для системы параметрической диагностики, работающей с большим массивом информации, выраженной в слабо формализуемом виде. Приводится описание процесса формирования базы знаний о параметрических образах дефектов на основе нечетких продукционных правил. Формализуется описание системы параметрической диагностики в виде теоретико-множественной модели. Приводятся основные этапы и особенности синтеза систем параметрической диагностики технологического оборудования на базе алгоритмов нечетких продукционных систем типа FIS.*

I. Введение

Обеспечение безопасности эксплуатации объектов энергетики и промышленности является важной задачей, функцию выполнения которой осуществляют автоматизированные системы управления. Наличие малого или скрытого дефекта в технологическом оборудовании способно нанести серьезный ущерб и спровоцировать развитие аварии. В связи с этим наибольший интерес с научной точки зрения вызывает проблема идентификации дефектов в оборудовании на ранних этапах их развития.

В большинстве случаев информация о характере проявления дефекта выражается в слабо или трудно формализуемом виде и основывается на опыте экспертов и эксплуатационной статистике по конкретному типу оборудования. Этот факт заставляет обращаться к аппарату искусственного интеллекта (ИИ), способному одинаково успешно решать как задачу анализа большого массива входной информации, выраженной в форме естественного языка, так и задачу ее обработки специальными логическим процедурами, в соответствии с правилами нечетких продукций. Особое место среди методов, реализуемых аппаратом ИИ, занимает теория распознавания образов, на сегодняшний момент получающая развитие в качестве инструмента для решения задач идентификации аварийных режимов оборудования в энергетике и технике в целом.

Любой дефект, возникающий в технологическом оборудовании, вносит характерные изменения в значения некоторых контролируемых параметров. При этом для различных типов дефектов степень изменения значений этих параметров индивидуальна, что дает возможность выделять характерные признаки дефектов в их параметрические образы [1].

В этой связи, актуальной проблемой является анализ и разработка новых методов идентификации скрытых дефектов технологического оборудования, основанных на параметрической диагностике его состояния, методом распознавания образов дефекта, выраженных характерным изменением технологических параметров, с использованием аппарата искусственного интеллекта.

II. Применение систем FIS в задачах технической диагностики

Нечеткие продукционные системы типа FIS являются хорошей основой для создания алгоритмов идентификации объектов и кластерного анализа на основе метода распознавания образов, заключенных в базе знаний системы FIS в виде нечетких продукционных правил вида «Если – То». Очевидным преимуществом выполнения идентификации дефектов на основе нечетких продукционных систем типа FIS является возможность пренебречь внутренними законами развития дефекта, тем самым значительно упрощая разработку самой системы [2].

Работа системы параметрической диагностики оборудования на основе распознавания образов дефектов сопровождается выполнением операций над множествами (множеством входных переменных – значений технологических параметров; множеством выходных переменных – типов идентифицируемых дефектов), в связи с чем наиболее предпочтительным видом описания системы будет являться теоретико-множественная модель (1).

$$M = (A, R) \tag{1}$$

В общем виде, теоретико-множественной моделью системы является такая модель, в которой в описании объекта моделирования, как системы, используются множества и заданные на этих множествах отношения между ее элементами, где $A -$ базовое множество модели; $R -$ множество заданных на A отношений элементов [3].

Для рассматриваемой задачи модель (1) представляется в следующем виде (2):

$$M = (D, X, Z, Q, R), \qquad i = \overline{1, n}\,, \tag{2}$$

где $D -$ множество всех типов дефектов; $X -$ множество значимых технологических параметров; $Z -$ множество абстрактных значений, характеризующих степень изменения значения элемента из множества X; $Q -$ множество абстрактных значений, характеризующих скорость изменения значения элемента из множества X; $R -$ множество отношений элементов множеств, выраженной базой знаний нечетких правил системы.

III. Алгоритм FIS для системы параметрической диагностики технологических объектов управления

Алгоритм системы параметрической диагностики дефектов на основе системы FIS в общем виде представляет собой выполнение следующих последовательных этапов:

1. прием значений входных переменных алгоритма – значимых технологических параметров;
2. приведение значений входных переменных к нечеткости на основе заданных функций принадлежности;
3. выполнение логических процедур, сформированных базой знаний о параметрических образах дефектов и выраженных правилами нечетких продукций вида «Если - То»;
4. формирование четкого выходного значения, о соответствующем параметрическому образу типе дефекта.

Первостепенной задачей при разработке системы диагностики на основе FIS является выбор лингвистических переменных (термов) и соответствующих им терм-множеств. В приложении к рассматриваемой задаче определение перечня термов основано на количестве значимых технологических параметров, наиболее чувствительных к наличию дефекта. Среди них могут быть значения давления, температуры, расхода и др. Количество и значения элементов терм-множества для каждой лингвистической переменной должно быть обосновано в соответствии с решаемой для конкретного типа объекта задачей идентификации дефектов.

Основой работы системы параметрической диагностики технологических объектов управления на основе систем FIS является база знаний, выраженная правилами нечетких продукций вида «Если - То». В задаче определения конкретного дефекта в технологическом оборудовании, результат идентификации является четким значением, в связи с чем для системы параметрической диагностики применителен тип нечетких продукционных правил, в которых предпосылки (антецеденты) правил представлены в виде нечетких лингвистических высказываний, а заключения (консеквенты) в виде четких значений [4].

В общем виде нечеткое правило для определения параметрического образа дефекта может быть представлено в составном виде (3):

$$\Pi_i: \text{ЕСЛИ } \boldsymbol{p_i} \text{ есть } \boldsymbol{A_{i1}} \text{ И/ИЛИ } \ldots \text{ И/ИЛИ } \boldsymbol{p_j} \text{ есть } \boldsymbol{A_{ij}}, \text{ТО } \boldsymbol{B_{ij}}, i = 1 \ldots n, j = 1 \ldots m, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{A_{ij}}, \boldsymbol{B_{ij}} -$ лингвистические термы, представляющие собой нечеткие множества.

Или в виде совокупности простых правил (4):

$$\Pi_i \rightarrow \begin{cases} \text{ЕСЛИ } \boldsymbol{p_i} \text{ есть } \boldsymbol{A_{i1}}, \text{ТО } \boldsymbol{B_i}, \\ \text{ЕСЛИ } \boldsymbol{p_i} \text{ есть } \boldsymbol{A_{i2}}, \text{ТО } \boldsymbol{B_i}, \\ \ldots \\ \text{ЕСЛИ } \boldsymbol{p_i} \text{ есть } \boldsymbol{A_{ij}}, \text{ТО } \boldsymbol{B_i}. \end{cases}, i = \overline{1,n}. \quad (4)$$

Таким образом, на основе приведенных выше этапов формируется система параметрической диагностики дефектов технологических объектов управления, основанная на анализе данных технологического контроля, значения которых сравниваются с образами дефектов, заключенными в базе знаний системы FIS.

IV. Заключение

В задачах диагностики дефектов технологических объектов управления в условиях, когда массив входных диагностических данных (контролируемых технологических параметров) имеет большую размерность, а физическая природа процессов, происходящих внутри объекта при реализации дефекта слабо формализуема или вовсе не поддается формализации, аппарат искусственного интеллекта является перспективным инструментом для создания основы систем параметрической диагностики.

В свою очередь, поскольку работа системы параметрической диагностики основана на методе распознавания образов дефектов, выраженных экспертными знаниями и статистикой, использование нечетких продукционных систем типа FIS является обоснованным. Преимуществом выбора систем такого типа является отсутствие необходимости формализации знаний о внутренних законах развития дефекта для конкретного объекта, что в свою очередь позволяет масштабировать представленный подход на любой объект управления из области энергетики, машиностроения, химико-технологических процессов и др.

Литература

[1] *Герасимов Н.Г., Проталинский О.М.* Техническая диагностика дефектов энергетического оборудования на основе ANFIS-сетей // *Математические методы в технологиях и технике*. – 2024. – № 6. – С. 27-30.

[2] *Rong H. J., Yang Z. X.* Fuzzy Inference Systems //*Sequential Intelligent Dynamic System Modeling and Control*. – *Singapore: Springer Nature Singapore*, 2024. – С. 3-18.

[3] *Воронов М.В.* Моделирование слабоструктурированных проблем. – 2010.

[4] *Борисов, В.В.* Нечеткие модели и сети. Монография / *В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов*. – Москва: Горячая линия - Телеком, 2012. – 284 с.

Интеллектуальный модуль автоматического управления с адаптацией к параметрам объекта на примере навигационного комплекса БПЛА

П. М. Трефилов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
petrtrfi@ipu.ru

***Аннотация**. В работе представлен интеллектуальный модуль автоматического управления, предназначенный для применения в составе навигационного комплекса малого беспилотного летательного аппарата. Модуль реализует адаптацию параметров регулятора на основе оценки динамических характеристик объекта с использованием упрощённой модели первого порядка в реальном времени. Для повышения устойчивости к помехам применяется рекурсивная фильтрация входных данных. Реализация алгоритма ориентирована на ресурсоограниченные вычислительные платформы. Проведены испытания на экспериментальном БПЛА с инерциальной и спутниковой навигацией. Полученные результаты показали способность модуля к автоматической перенастройке и поддержанию устойчивости управления при изменении параметров платформы и условий полёта без участия оператора.*

I. Введение

Автоматизация управления малыми беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) становится всё более востребованной задачей как в научных, так и в прикладных проектах - от мониторинга и картографирования до поисково-спасательных и технологических операций. При этом устойчивость и точность навигационно-управляющих контуров в значительной степени зависят от надёжности измерений, корректности моделей и адекватной настройки регуляторов.

На практике параметры объекта управления могут существенно изменяться в процессе эксплуатации: масса и аэродинамические характеристики варьируются при смене полезной нагрузки, погодные условия влияют на устойчивость, а качество измерений зависит от помех, потери сигнала спутниковых навигационных систем (СНС) или деградации сенсоров. В этих условиях жёстко настроенные схемы управления оказываются недостаточно гибкими, а классические ПИД-регуляторы - неустойчивыми или малоэффективными.

Для повышения адаптивности и отказоустойчивости управления целесообразно использовать интеллектуальные подходы, которые позволяют системе самостоятельно уточнять параметры модели и настраивать управляющее воздействие в соответствии с текущим состоянием объекта и измерительной информации. При этом важно учитывать ограничения по вычислительным ресурсам и энергии, особенно для малых БПЛА.

В данной работе рассматривается архитектура и реализация интеллектуального модуля автоматического управления, способного выполнять адаптацию параметров регулятора в реальном времени без участия оператора. Основу решения составляют: сглаживание шумных измерений с помощью фильтра Калмана, оценка параметров объекта с использованием рекурсивного метода наименьших квадратов и автоматическая настройка ПИД-регулятора на основе аппроксимированной модели объекта. Модуль реализован в виде компактного программного блока, пригодного для внедрения в стандартные контроллеры навигационных систем малых БПЛА.

II. Структура работы модуля

Разрабатываемый интеллектуальный модуль автоматического управления предназначен для интеграции в навигационно-управляющий контур малого БПЛА и обеспечивает выполнение трёх ключевых функций: предварительная обработка измерений, оценка параметров объекта и автоматическая настройка регулятора. Архитектура модуля представлена в виде последовательной обработки данных в цикле реального времени.

В условиях эксплуатации БПЛА измерения навигационных параметров (скорости, высоты, углов ориентации) подвержены флуктуациям, шумам и задержкам. Для повышения устойчивости работы регулятора в модуле реализована фильтрация входных сигналов с помощью рекурсивного одношагового фильтра Калмана. В дискретной форме оценка состояния производится по формуле

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_z(z_k - \hat{x}_{k-1}), \qquad K_k = \frac{P}{P+R} \tag{1}$$

где $\hat{x}_k$ -оценка измеряемого параметра на шаге k, z_k -поступившее измерение, P - ковариация априорной ошибки, R - оценка дисперсии шума измерения. Значения P и R задаются эмпирически на этапе конфигурации.

Для обеспечения автоматической адаптации регулятора к текущему состоянию летательного аппарата в модуле реализован контур оценки параметров объекта управления. Целью данного этапа является определение динамических характеристик конкретного канала (например, по крену, тангажу или скорости) на основе поступающих данных об управляющем воздействии и измеряемом отклике системы. Модель объекта управления рассматривается в виде аппроксимации первого порядка:

$$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(t) \tag{2}$$

где *u(t)* - управляющее воздействие, *y(t)* - наблюдаемая выходная переменная навигационных параметров (например, угол наклона, скорость), K - статический коэффициент усиления, T - постоянная времени. Оценка параметров K и T выполняется по данным реального времени с использованием рекурсивного метода наименьших квадратов с экспоненциальным забыванием. Это позволяет модулю отслеживать плавные изменения динамики объекта, вызванные, например, перераспределением нагрузки, сменой аккумулятора или изменением аэродинамических условий.

Дискретизированная форма модели применяется в виде разностного уравнения первого порядка, где производная приближённо вычисляется по сглаженному сигналу:

$$\Delta y_k \approx \frac{y_k - y_{k-1}}{\Delta t}, \text{ и далее } \theta_k = \begin{bmatrix} T_k \\ K_k \end{bmatrix} \tag{3}$$

Рекурсивное обновление параметров реализуется по классическим формулам:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + L_k(y_k - \phi_k^T\theta_{k-1}) \tag{4}$$

$$L_k = \frac{P_{k-1}\phi_k}{\lambda + \phi_k^T P_{k-1}\phi_k} \tag{5}$$

$$P_k = \frac{1}{\lambda}\left(P_{k-1} - \frac{P_{k-1}\phi_k\phi_k^T P_{k-1}}{\lambda + \phi_k^T P_{k-1}\phi_k}\right) \tag{6}$$

где ϕ_k - вектор регрессоров, $\lambda \in (0,1]$ -коэффициент забывания, P_k - ковариационная матрица. При выборе $\lambda < 1$ алгоритм становится чувствительным к недавним изменениям, позволяя отследить даже быстро происходящие вариации параметров.

Полученные оценки передаются в блок адаптивной настройки регулятора, обеспечивая автоматическую коррекцию его коэффициентов. Это позволяет модулю сохранять устойчивость и требуемое быстродействие управления при изменении характеристик объекта, без вмешательства оператора и без необходимости априорной точной модели.

Следует отметить, что, несмотря на наличие более сложных моделей динамики БПЛА [1], использование модели первого порядка на данном этапе необходимо для обеспечения работоспособности алгоритма в реальном времени при ограниченных ресурсах бортовой вычислительной платформы. Это решение является инженерным компромиссом между точностью аппроксимации и вычислительной эффективностью.

После получения текущих оценок параметров объекта K и T, модуль управления выполняет автоматический пересчёт коэффициентов ПИД-регулятора. Целью является обеспечение требуемой динамики замкнутой системы - в частности, допустимого времени переходного процесса и отсутствия перерегулирования.

Настройка основана на эмпирических формулах типа Циглера–Никольса с коррекцией под идентифицированные параметры. В частности, при заданной целевой постоянной времени τ и принятой структуре регулятора параметры определяются следующим образом:

$$K_p = \frac{1.2T}{K\tau}, K_i = \frac{2K_p}{T_i}, K_d = 0.5T_i \quad (7)$$

Где T_i - интегральная постоянная, выбираемая с учётом допустимого запаздывания.

III. Заключение

Представлен модуль автоматического управления для малых мультироторных БПЛА, реализующий адаптацию параметров регулятора на основе оценки текущей динамики объекта. Использование упрощённой аппроксимации модели первого порядка позволило обеспечить устойчивую и вычислительно эффективную идентификацию параметров в реальном времени. Полученные оценки применялись для онлайн-настройки ПИД-регулятора без участия оператора. Испытания показали устойчивость системы при внешних возмущениях, шумных измерениях и кратковременной потере GNSS-сигнала. Предложенная архитектура может быть использована в составе встроенных навигационно-управляющих комплексов малых БПЛА, ориентированных на автономную работу в изменяющихся условиях. В дальнейшем планируется расширение алгоритма за счёт включения нелинейных моделей, а также интеграция адаптивной логики в контуры позиционирования и высотной стабилизации.

Литература

[1] *Трефилов П. М., Тевяшов Г. К.* Моделирование математической модели БПЛА мультироторного типа в среде Matlab // *Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами»* (УБС'2021, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 503–514,

[2] *Трефилов П. М.* Алгоритм интеграции сенсорных данных для оценки состояния автономных роботов в интеллектуальной транспортной среде // *Управление большими системами*. – 2024. – Вып. 112. – С. 257–273

[3] *Sun M., Davies M. E., Proudler I., Hopgood J. R.* Adaptive Kernel Kalman Filter *// 2021 Sensor Signal Processing for Defence Conference (SSPD)*. – Edinburgh, United Kingdom, 2021. – P. 1–5.

Моделирование процесса аэрозольной обработки местности автономным квадрокоптером

С. А. К. Диане
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
diane1990@yandex.ru

***Аннотация**. В докладе представлены результаты разработки технологического процесса по аэрозольной обработке участка местности автономным квадрокоптером в целях поддержания надлежащего фитосанитарного состояния произрастающих на нем сельскохозяйственных культур. Для реализации автономного перемещения квадрокоптера-распылителя созданы упрощенные кинематическая и технологическая модели летательного аппарата. Предложен графовый алгоритм планирования маршрута движения квадрокоптера в условиях переменности аэродинамических свойств распыляемой аэрозольной смеси и неопределенности погодных условий. Разработана методика имитационного моделирования автономного квадрокоптера. Описаны критерии эффективности опрыскивания местности аэрозольной смесью (прецизионность и равномерность покрытия). Намечены пути развития подхода.*

I. Введение

В последние годы автономные мультироторные системы, в частности квадрокоптеры, все чаще рассматриваются как перспективная платформа для эффективной и безопасной обработки сельскохозяйственных земель [1]. Среди задач, решаемых квадрокоптерами, можно выделить картографирование и мониторинг сельскохозяйственных полей, автоматизированную посадку семян, опрыскивание растений пестицидными и гербицидными растворами. Последняя задача, лежащая на пересечении областей робототехники и аэрогидродинамики, вызывает особый интерес в инженерном сообществе ввиду своей наукоемкости [2]. Многофорсуночные дроны потенциально способны обеспечить лучшее покрытие местности при равной или меньшей длине проходимого пути, обеспечить адаптивность технологического процесса по опрыскиванию растений в условиях ветра и сложного рельефа местности.

В основу алгоритмического обеспечения квадрокоптера-распылителя для аэрозольной обработки местности целесообразно положить геометрические и графовые методы для планирования наикратчайшего маршрута его движения с поправкой на фактор ветра. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что наряду с координатами центра масс квадрокоптера необходимо учитывать координаты форсунок, через которые происходит процесс распыления аэрозоля (смеси агрохимикатов и воды).

II. Методика моделирования автономного квадрокоптера

В рамках комплексного моделирования летательного аппарата, оснащаемого механизмом распыления аэрозоля, необходимо учитывать, что число и положение используемых форсунок могут варьироваться (рис. 1).

Координаты каждой из форсунок в плоскости участка местности, согласно предлагаемой кинематической модели квадрокоптера, рассчитываются по формуле:

$$\begin{pmatrix} x_i^{(\mu)} \\ y_i^{(\mu)} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos(\alpha+\beta) & sin(\alpha+\beta) & x_d \\ -sin(\alpha+\beta) & cos(\alpha+\beta) & y_d \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \left(i - \frac{N_n+1}{2}\right) \cdot d \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где (x_d, y_d) – координаты квадрокоптера на местности; α – азимутальный угол квадрокоптера; β – угол поворота подвеса с форсунками; d – шаг смещения форсунок на раме квадрокоптера; $i = 1 \ldots N_n$ – номер форсунки.

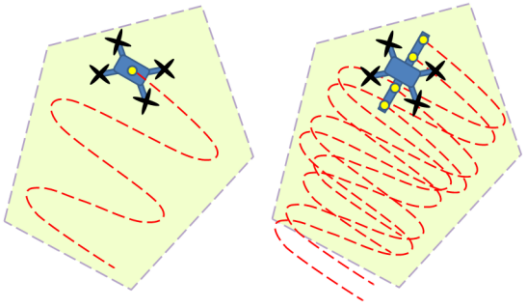


Рис. 1. Схема применения квадрокоптеров с 1 и 4 форсунками

Для снижения вычислительной сложности модели можно применить метод крупных частиц [3]. Координаты частиц в области под форсункой при отсутствии ветра можно приближенно моделировать случайной величиной, имеющей нормальное распределение:

$$X \sim \mathcal{N}(\mu, \Sigma), X \in \mathbb{R}^2, \tag{2}$$

где $\mu = (x_i^{(\mu)}, y_i^{(\mu)})$ – математическое ожидание точки падения частицы (фактически, положение *i*-й форсунки над местностью); Σ – матрица ковариации, отражающая степень разброса капель аэрозольной смеси (для определенного сочетания параметров системы распыления и высоты h_{drone} полета квадрокоптера).

Зададим модель частицы аэрозоля в виде набора параметров:

$$M_p = \{x_p, y_p, h_p, v_x, v_y, v_h\}, \tag{3}$$

где (x_p, y_p) – координаты частицы на плоскости; h_p – высота частицы над поверхностью; (v_x, v_y) – скорость частицы в горизонтальной плоскости; v_h – скорость ее осаждения.

Время осаждения частицы определяется формулой:

$$t_{land} = \frac{h_{drone}}{v_h} \tag{4}$$

При наличии ветра математическое ожидание точки осаждения частицы смещается и принимает следующий вид:

$$\begin{pmatrix} x_p^{(\mu)} \\ y_p^{(\mu)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i^{(\mu)} \\ y_i^{(\mu)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x^{(wind)} \\ v_y^{(wind)} \end{pmatrix} \cdot t_{land}, \tag{5}$$

где $(v_x^{(wind)}, v_y^{(wind)})$ – скорость ветра.

Число моделируемых капель, формируемых в *i*-форсунке в интервал времени Δt, определяется согласно разработанной технологической модели следующим образом:

$$\hat{n}_i = \frac{r_s \cdot \Delta t}{V_p \cdot N_n}, \tag{6}$$

где r_s – скорость расхода аэрозольной смеси; V_p – объем моделируемой капли; N_n – общее число форсунок.

III. Алгоритм маршрутизации автономного квадрокоптера

Маршрут движения квадрокоптера определяется по решетчатому графу *G* местности с применением метода поиска в глубину [4] (рис. 2). Данный граф формируется путем разбиения полигонального участка *D* сельскохозяйственного поля на квадратные дискреты и соединению центров соседних дискрет (узлов графа) ребрами. Размер *s* ячеек местности выбирается на порядок меньшим, чем характеристический размер σ зоны осаждения аэрозоля, выражаемый из матрицы Σ.

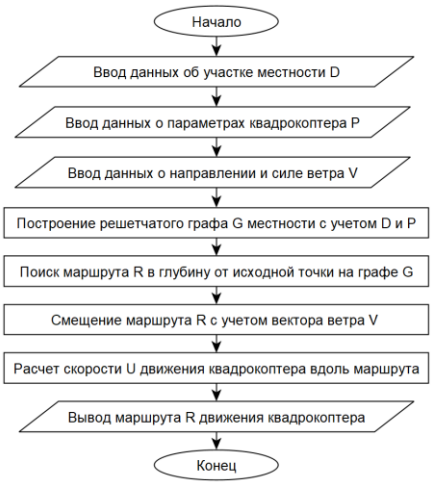


Рис. 2. Графовый алгоритм планирования маршрута квадрокоптера-распылителя

В опорных точках маршрута квадрокоптер распыляет аэрозоль над растениями, осуществляя технологическое смещение против ветра по формуле:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} v_x^{(wind)} \\ v_y^{(wind)} \end{pmatrix} \cdot t_{land}. \tag{7}$$

Прецизионность покрытия местности аэрозолем может быть оценена через отношение числа моделируемых частиц внутри участка D к общему числу частиц:

$$Q_A = \frac{N_{inside}}{N_{total}}. \tag{8}$$

Равномерность покрытия местности аэрозолем выражается через поверхностный интеграл отклонения локальной плотности осаждения аэрозоля от ее усредненного значения:

$$Q_U = 1 - \frac{\iint_D \left|\rho_{spray}(x,y) - \bar{\rho}_{spray}\right| \cdot dxdy}{\iint_D \bar{\rho}_{spray} dxdy}. \tag{9}$$

IV. Заключение

В рамках исследования были разработаны методика моделирования и алгоритм планирования маршрута автономного квадрокоптера-распылителя. Сформированы критерии оценки эффективности технологического процесса по опрыскиванию растений.

В дальнейшем, для усовершенствования предложенного алгоритма планируется учитывать рельеф местности, а также осуществлять визуальную идентификацию растений для обеспечения их точечной обработки в целях экономии агрохимикатов.

Литература

[1] *N.R. Gatkal, S.M. Nalawade, G.B. Bhanage, R.K. Sahni, A.A. Walunj, P.B. Kadam and M. Ali*, “Review of UAVs for efficient agrochemical spray application”, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 18 (1) , 2025, pp. 1-9.

[2] *E.V. Vazquez-Carmona, J.I. Vasquez-Gomez, J.C.H. Lozada and M. Antonio-Cruz*, “Coverage path planning for spraying drones,” arXiv:2105.08743, 2021, pp. 1-36.

[3] *M. W. Evans, F. H. Harlow*, “The particle-in-cell method for hydrodynamic calculations”, *Los Alamos Scientific Lab. Rept*. № LA-2139, Los Alamos, 1957.

[4] *L. Shi*, “Research on Path Planning Method based on Graph Search Algorithm”, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, Vol. 97, 2024, pp. 267-274.

Нечеткая модель Такаги-Сугено в задаче прогнозирования электропотребления инжекционной машины термопластавтомата ТПА

Е. С. Дуванов[1], А. Ф. Пащенко[2], И. Ю. Кудинов[3]

[1]Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия,

[2]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,

[3]ООО «Анлимитед Продакшен», г. Москва, Россия,

evgenyduvanov@yandex.ru, paschenko_alex@mail.ru, atom_lipetsk@list.ru

Аннотация. *Рассматривается возможность применения нечеткой модели Такаги-Сугено в задаче прогнозирования электропотребления промышленной инжекционной машины термопластавтомата*

I. Введение

Инжекция – технологический процесс переработки пластмасс путем впрыска расплава полимера под давлением в литьевую форму с последующим его охлаждением. Инжекция является самым энергоемким по затратам процессом в производстве изделий [1].

Средние энергозатраты при литье пластмасс составляют примерно 0,9–1,6 кВтч на 1 кг готовой продукции, при этом на базовую нагрузку (работу оборудования вхолостую) приходится 20–40 % общего потребления предприятия.

В пересчете на час работы энергопотребление машин обычно варьируется от 10 до 50 кВтч в зависимости от размера и типа установки (*Biraghi*, *Haitian*).

Значительная часть энергии тратится на нагрев полимера до 200–400 °C, охлаждение и работу гидравлики, особенно при высоком усилии смыкания и большом объеме впрыска.

Машина со шнеком 35 мм, производящая отливку весом 75 г за цикл длительностью около 16 с, может потреблять до 0,1–0,3 кВт·ч за цикл, что соответствует указанному диапазону.

II. Описание модели

Рассматриваются полученные производственные данные за 2024 год, состоящие из шести входных переменных: $x1$, $x2$, $x3$ – ТПА (три группы) – среднее потребление за смену, кВтч; $x4$ – температура окружающей среды, °C; $x5$ – количество изделий за производственный цикл, шт.; $x6$ – среднее потребление при охлаждении за смену, кВтч; и одной целевой выходной переменной: y – общее среднее потребление при инжекции за смену, кВтч.

На основании данных технологического процесса задаются параметры модели – 6 входов и 1 выхода, тип нечеткой Такаги-Сугено модели - линейная (1).

$$R^{\theta}: \textit{если } x_1 \textit{ есть } X_1^{\theta},\ x_2 \textit{ есть } X_2^{\theta}, \dots, x_m \textit{ есть } X_m^{\theta}, \textit{то } y^{\theta} = c_0^{\theta} + \sum_{j=1}^{m} c_j x_j, \qquad (1)$$

где $\theta = \overline{1,q}, j = \overline{1,m}$; θ – номер правила; q – число правил; j – номер входной переменной; $m = 6$ – количество входных переменных; $c^{\theta} = (c_0^{\theta}, c_1^{\theta}, \dots, c_m^{\theta})$ – вектор коэффициентов; X_l^{θ}, Y^{θ} – нечеткие множества, характеризующиеся функциями принадлежности $X_l^{\theta}(x_l, d_l^{\theta}), Y^{\theta}(y, d^{\theta})$, векторов параметров d_l^{θ} и d^{θ}.

В качестве критерия идентификации в программном комплексе задается относительную среднемодульную ошибку (2)

$$J = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left|\frac{y(k) - \hat{y}(k)}{y(k)}\right| \qquad (2)$$

Векторы коэффициентов линейных уравнений $\boldsymbol{c}(k)$ нечеткой модели, определяется рекуррентным методом наименьших квадратов, а параметры функции принадлежности d определяются генетическим алгоритмом.

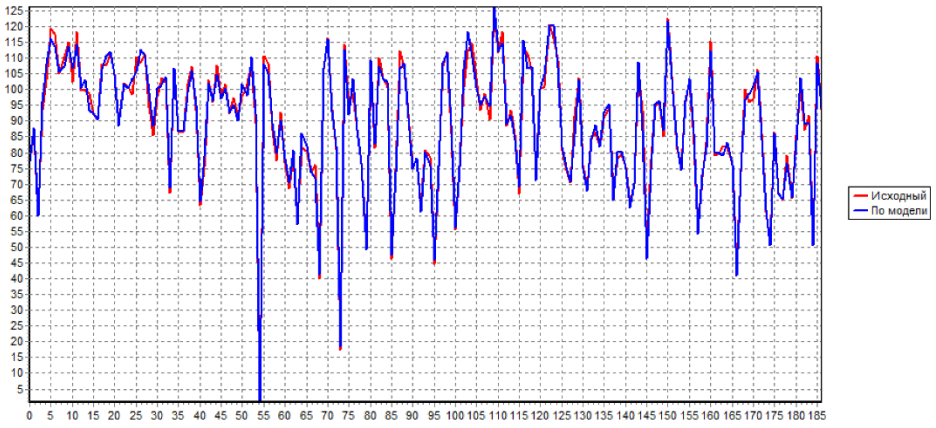


Рис.1. График выходов модели

Получено 7 нечетких правил. Относительная среднемодульная ошибка

$$J = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left|\frac{y(k)-\hat{y}(k)}{y(k)}\right| = 2{,}1998\ \% \qquad (3)$$

Ниже представлены два из семи полученных нечетких правил в естественном виде:

$\boldsymbol{R}^1$: если $x_1(i)$ есть $\boldsymbol{X}_1^1$[0,0667; 5,0854; 10,1042; 20,125; 34,1625; 48,2], $x_2(i)$ есть $\boldsymbol{X}_2^1$[0,0333; 4,7823; 9,5313; 19,0208; 32,3104; 45,6], $x_3(i)$ есть $\boldsymbol{X}_3^1$[0,3667; 5,1; 9,8333; 19,2083; 32,3792; 45,55], $x_4(i)$ есть $\boldsymbol{X}_4^1$[-11,4533; -8,0694; -4,6854; 4,9458; 16,9979; 29,05], $x_5(i)$ есть $\boldsymbol{X}_5^1$[71,3891; 98,2173; 125,0455; 160,8545; 219,9109; 278,9673], $x_6(i)$ есть $\boldsymbol{X}_6^1$[50,5078; 112,4794; 174,4511; 285,7675; 447,9238; 518,5682], то y^1 = -0,3777 + 0,9624*$x_1(i)$ + 1,0049*$x_2(i)$ + 0,9675*$x_3(i)$ - 0,2343*$x_4(i)$ - 0,0039*$x_5(i)$ + 0,0177*$x_6(i)$

$\boldsymbol{R}^2$: если $x_1(i)$ есть $\boldsymbol{X}_1^2$[3,4667; 8,8167; 14,1667; 24; 38,2; 52,4], $x_2(i)$ есть $\boldsymbol{X}_2^2$[0,0333; 5,3187; 10,6042; 21,1667; 35,9583; 50,75], $x_3(i)$ есть $\boldsymbol{X}_3^2$[0,7333; 5,45; 10,1667; 19,4167; 32,4583; 45,5], $x_4(i)$ есть $\boldsymbol{X}_4^2$[-6,9867; -3,2506; 0,4854; 9,7042; 21,7371; 33,77], $x_5(i)$ есть $\boldsymbol{X}_5^2$[78,3709; 104,4218; 130,4727; 162,9818; 218,2909; 273,6], $x_6(i)$ есть $\boldsymbol{X}_6^2$[69,823; 138,6821; 207,5412; 327,8037; 504,8991; 681,9945], то y^2 = -9,9943 + 0,9309*$x_1(i)$ + 0,9407*$x_2(i)$ + 0,9474*$x_3(i)$ + 0,27*$x_4(i)$ - 0,0161*$x_5(i)$ + 0,0182*$x_6(i)$

III. Заключение

Полученная модель представляет интерес при прогнозировании электропотребления, учитывая определенные входные параметры.

Литература

[1] *Глебова А.А., Ковалева А.Н.* Моделирование процесса литья под давлением полимерных композиционных материалов //*Инновационные технологии в электронике и приборостроении*. – 2021. – С. 324-328.

[2] *Кудинов Ю.И.* Нечеткие модели и системы управления / *Кудинов Ю.И., Келина А.Ю., Кудинов И.Ю., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф.* // М.: Ленанд. – 2017. – Т. 328.

Об оптимизации электродинамической системы угловой стабилизации КА с помощью метода роя частиц при наличии постоянно действующих возмущений

М. В. Максименко, К. Г. Петров, А. А. Тихонов
Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
m.v.maksimenko@spbu.ru, konstantin.g.petrov@spbu.ru, a.tikhonov@spbu.ru

Аннотация. *В работе рассматривается космический аппарат (КА), движущийся по околоземной круговой орбите произвольного наклонения в магнитном и гравитационном полях Земли. КА оснащен электродинамической системой управления угловым движением КА, включающий в себя управляющие моменты: лоренцев и магнитный. Изучается процесс стабилизации КА в непрямом положении равновесия с учетом неизвестного малого возмущающего момента, который может быть вызван неоднородностью или неточностью модели геомагнитного поля, данных о положении КА и др. Ставится задача о подборе коэффициентов усиления управляющих моментов, которые определяются с помощью метода роя частиц с учетом параметров КА, орбиты и начальных данных об угловом положении и угловой скорости КА. Задача решается без ограничений на порядок точности модели геомагнитного поля. Приведены результаты численных экспериментов, демонстрирующих работоспособность предложенного управления.*

I. Введение

Рассматривается КА, движущийся по кеплеровой круговой орбите произвольного наклонения в гравитационном и магнитном полях Земли. Решается задача стабилизации главных центральных осей инерции КА $Cxyz$ относительно осей орбитальной системы координат $C\xi\eta\zeta$ с ортами $\vec{\xi}_0, \vec{\eta}_0, \vec{\zeta}_0$ в целевом положении, определяемом значением $\mathbf{A_0}$ матрицы направляющих косинусов между осями $C\xi\eta\zeta$ и $Cxyz$. В “самолетных” углах ориентации целевое положение определяется значениями

$$\varphi = \varphi_0, \qquad \theta = \theta_0, \qquad \psi = \psi_0, \qquad \vec{\omega}' = \vec{0}, \tag{1}$$

где $\vec{\omega}'$ – угловая скорость КА относительно системы координат $C\xi\eta\zeta$.

Электродинамическая система управления угловым движением КА базируется на использовании управляющих моментов [1]:

$$\vec{M}_L = \left(\vec{P}_{rest} + \vec{P}_{diss} + \vec{P}_{comp}\right) \times \vec{T}, \qquad \vec{M}_M = \left(\vec{I}_{rest} + \vec{I}_{diss} + \vec{I}_{comp}\right) \times \mathbf{A}^{\top}\vec{B}, \tag{2}$$

где $\vec{B}$ – вектор индукции геомагнитного поля, заданный в системе $C\xi\eta\zeta$, $\vec{T} = \mathbf{A}^{\top}\left(\vec{v}_C \times \vec{B}\right)$, $\vec{v}_C$ – скорость центра масс КА относительно Земли, вращающейся с угловой скоростью $\vec{\omega}_E$, $\vec{P}_{rest}, \vec{P}_{diss}, \vec{P}_{comp}$ – соответственно восстанавливающая, диссипативная и компенсирующая составляющие управляемого вектора $\vec{P} = Q \cdot \overrightarrow{CO}$, причем Q – электростатический заряд КА, O – центр заряда КА, $\vec{I}_{rest}$, $\vec{I}_{diss}$, $\vec{I}_{comp}$ – соответственно восстанавливающая, диссипативная и компенсирующая составляющие вектора управляемого собственного магнитного момента $\vec{I}$.

Движение КА, находящегося в гравитационном и магнитном полях Земли, описывается системой дифференциальных уравнений Эйлера-Пуассона:

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{J}\vec{\omega}) + \vec{\omega} \times (\mathbf{J}\vec{\omega}) = \vec{M}_{GR} + \vec{M}_L + \vec{M}_M + \vec{M}_{Dist}, \tag{3}$$

$$\frac{d\vec{\xi}_0}{dt} = \vec{\xi}_0 \times \vec{\omega} - \omega_0\vec{\zeta}_0, \qquad \frac{d\vec{\eta}_0}{dt} = \vec{\eta}_0 \times \vec{\omega}, \qquad \frac{d\vec{\zeta}_0}{dt} = \vec{\zeta}_0 \times \vec{\omega} + \omega_0\vec{\xi}_0. \tag{4}$$

Здесь $\mathbf{J} = \mathrm{diag}(A, B, C)$ – тензор инерции КА, $\vec{\omega} = \vec{\omega}' + \omega_0\vec{\eta}_0$ – абсолютная угловая скорость КА, $\omega_0\vec{\eta}_0$ – угловая скорость вращения орбитальной системы координат относительной инерциальной, $\vec{M}_{GR} = 3\omega_0^2\left(\mathbf{A}^{\top}\vec{\zeta}_0\right) \times \left(\mathbf{J}\mathbf{A}^{\top}\vec{\zeta}_0\right)$ – гравитационный момент. Кроме того, в отличие от работы [1], где рассматривалась аналогичная задача, здесь, наряду со значительным по величине,

но известным возмущающим гравитационным моментом, учитывается также малый по модулю неизвестный возмущающий момент $\vec{M}_{Dist}$, такой что $|\vec{M}_{Dist}| \ll |\vec{M}_{GR}|$. Далее будем учитывать $\vec{M}_{Dist}$ в уравнениях движения как постоянно действующий возмущающий момент, зависящий только от времени случайным образом. После компенсации гравитационного момента и возмущающих компонент инерционных членов динамических уравнений, получим

$$\frac{d}{dt}\mathbf{J}[(\vec{\omega}' + \omega_0\vec{\eta}_0)] + (\vec{\omega}' + \omega_0\vec{\eta}_0) \times (\mathbf{J}\vec{\omega}') + \omega_0\vec{\omega}' \times (\mathbf{J}\vec{\eta}_0) =$$
$$= Qk_L\overrightarrow{T_0} \times \vec{T} + Qh_L(\vec{\omega}' \times \vec{T}) \times \vec{T} + k_M\vec{B}_0 \times \left(\mathbf{A}^\top\vec{B}\right) + h_M(\vec{\omega}' \times \mathbf{A}^\top\vec{B}) \times \left(\mathbf{A}^\top\vec{B}\right) + \vec{M}_{Dist}. \quad (5)$$

Скалярные коэффициенты k_L, h_L, k_M, h_M находятся в нашем распоряжении. Примеры, приведенные в [1], показывают, что эти коэффициенты могут быть взяты достаточно малыми из области выполнения достаточных условий асимптотической устойчивости. При этом управляющие моменты в процессе стабилизации КА оказываются сравнимы по величине с гравитационным моментом.

Ранее не рассматривались ни методы, ни критерии выбора этих коэффициентов. Однако, для повышения качества переходных процессов важно заметить, что коэффициенты управления могут быть выбраны исходя из тех или иных критериев оптимальности управления. В данной работе для отыскания этих коэффициентов применяется метод роя частиц [2], хорошо зарекомендовавший себя как метод оптимизации в различных задачах космодинамики [3,4].

II. Результаты численных экспериментов

Согласно [5], возмущающий момент может быть выбран в виде

$$\vec{M}_{Dist} = 10^{-6}\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} + 2 \cdot 10^{-6}\begin{pmatrix} sin(\omega_0 t) \\ sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4}\right) \\ sin\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{4}\right) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где r_i $(i = 1,2,3)$ – случайное число из промежутка $[-1,1]$.

Для параметров КА и орбиты (таблица 1) с заданными начальными условиями и заданным программным движением (1), приведенными в таблице 2, подберем с помощью метода роя частиц коэффициенты усиления управляющих моментов для случая $\vec{M}_{Dist} = \vec{0}$ и возмущающего момента $\vec{M}_{Dist} \neq \vec{0}$, заданного в виде (6). Расчеты проводятся для параметров Родрига-Гамильтона λ_i $(i = 0,..,3)$ как функций безразмерной переменной $u = \omega_0 t$.

Таблица 1. Параметры КА и орбиты

Величина	Q, Кл	A, кг·м^2	B, кг·м^2	C, кг·м^2	i, °	R, км
Значение	$5\cdot10^{-3}$	1000	1200	800	30	7000

Таблица 2. Начальные условия и программный режим стабилизации КА

Величина	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	Угловая скорость КА
Программный режим	0,9375	0,035	0,3071	0,1599	$\vec{\omega}' = \vec{0}$
Начальные значения	0,9938	−0,0997	0,0497	0,005	$\omega_x/\omega_0 = 0{,}3;\ \omega_y/\omega_0 = 1{,}1;\ \omega_z/\omega_0 = 0{,}5$

В методе роя частиц минимизировался функционал, представляющий собой интеграл по переменной u от суммы квадрата отклонения угловой ориентации КА от программного режима движения и квадрата относительной угловой скорости $\vec{\omega}'$. Размер роя – 20 частиц, количество итераций – 350. Заметим, что увеличение числа итераций до 1000 в разы увеличивает время компьютерного моделирования, обеспечивая при этом лишь незначительное уточнение минимума функционала в третьем знаке после запятой.

В результате программной реализации метода на языке Python были получены следующие значения коэффициентов усиления: $k_L = 49{,}00$; $h_L = 3426{,}56$; $k_M = 6{,}18 \cdot 10^6$; $h_M = 3{,}48 \cdot 10^9$.

Процесс стабилизации КА при наличии возмущений с найденными коэффициентами усиления приведен на рис.1.

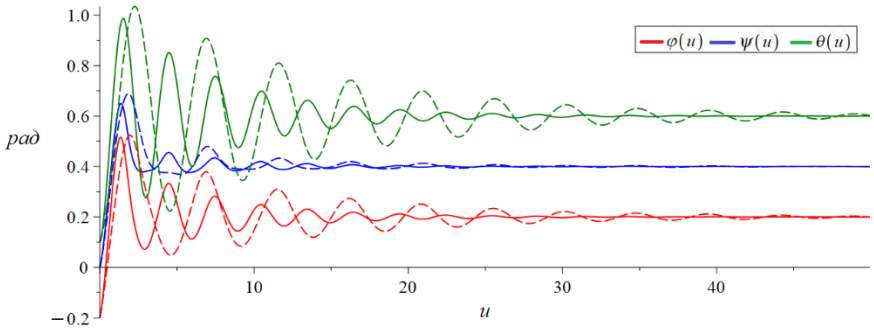


Рис.1. Процесс стабилизации при наличии возмущений с использованием параметров управления из работы [1] (пунктирная линия) и параметров, найденных с помощью метода роя частиц (сплошная линия)

III. Заключение

Исследован вопрос оптимизации электродинамического управления для угловой стабилизации КА в условиях постоянно действующих возмущений вида (6) на базе нелинейной математической модели, построенной без ограничений:

- на программную ориентацию КА в орбитальной системе координат;
- на наклонение орбиты КА;
- на порядок точности мультипольной модели геомагнитного поля.

Показано, что коэффициенты усиления в управляющих моментах, подобранные с помощью метода роя частиц, для выбранных значений параметров КА и его орбиты, начальных условий движения и заданного программного режима движения, приводят к сглаживанию и ускорению сходимости переходных процессов угловой стабилизации КА. Это имеет важное прикладное значение, когда на борту КА находится измерительная аппаратура, чувствительная к воздействию микроускорений. При этом оптимизация управления не связана с каким-либо существенным увеличением управляющих моментов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-41-02031, https://rscf.ru/project/24-41-02031/

Литература

[1] *M.V. Maksimenko, A.A. Tikhonov*, “Electrodynamic attitude stabilization of a satellite in an indirect position”, *Acta Astronautica*, 232, 2025, pp. 516-524.

[2] *Y. Shi, R.C. Eberhart*, “A modified particle swarm optimizer”, *Proc. IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK, USA*, 1998. pp. 69-73.

[3] *В.И. Каленова, В.М. Морозов, В.Ю. Сахаров, А.А. Тихонов,* “Об устойчивости стационарных движений спутника с центром распределения заряда защитных экранов в центре масс”, *Космические Исследования*, 63(4), 2025.

[4] *A. Drobysheva, D. Roldugin, S. Tkachev,* “Application of the PSO for the construction of a 3-axis stable magnetically actuated satellite angular motion”, *Acta Astronautica*, 195, 2022. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.03.001.

[5] *S. Dey, V. Dwivedi, Salahudden, D. Giri*, “Fixed-Time Attitude Control of Satellite Using Combined Magnetic and Magneto-Coulombic Actuators”, *Proc. IEEE Aerospace Conference*, 2019, pp. 1-9. DOI:10.1109/AERO.2019.8742218.

Transformer-based RUL prediction for bearings using time-frequency image features

N. S. Kolovorotnyy
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia,
nikitaphil2015@gmail.com

Abstract. *This work proposes an approach for predicting the Remaining Useful Life (RUL) of bearings by converting one-dimensional vibration signals into two-dimensional time–frequency images using Continuous Wavelet Transform (CWT), followed by processing these images with an encoder-transformer based on multi-head self-attention employing 1-D convolutions and a kernel function. Unlike conventional methods that rely on 2-D convolutional neural networks (CNN) to extract features, this method utilizes Multi-Head Attention modules with learnable positional embedding and sketch-based projections, reducing computational complexity by operating in a lower-dimensional sketch space. Vibration data from the NASA Bearing Dataset are transformed into images of size $L \times F$, partitioned into patches, and encoded similarly to Vision Transformers, with learned positional encodings. The sketching mechanism approximates the attention kernel via learnable projection matrices into $\mathbb{R}^r$, enabling efficient scaling to long sequences and demonstrating high accuracy in RUL estimation.*

I. Introduction

Predicting the Remaining Useful Life (RUL) of mechanical components is a critical task in predictive maintenance, aiming to minimize unplanned downtime and unexpected failures. Vibration signals carry rich information about the degradation state of bearings, yet direct analysis of one-dimensional time series often fails to capture the non-stationary and non-linear characteristics of wear processes. To address this issue, researchers have turned to time–frequency representations, among which Continuous Wavelet Transform (CWT) stands out for its ability to reveal how frequency content evolves over time. By mapping vibration signals into CWT-derived power spectra, one obtains intuitive two-dimensional images that highlight transient features associated with bearing faults. Prior work [1] successfully applied 2-D CNNs to CWT images for RUL prediction, achieving notable performance improvements.

Meanwhile, the original transformer architecture introduced in "Attention Is All You Need" demonstrated that self-attention alone can capture long-range dependencies without convolutions or recurrence [2]. However, applying pure Transformer models directly to image-like data leads to quadratic complexity in sequence length, motivating the development of hybrid and efficient attention mechanisms. Existing solutions often combine convolutional layers to exclude positional encoding layers [3] or employ attention weights calculations with linear complexity [4], but these approaches mostly fine-tuned for specific devices or lack some accuracy.

In this paper, new method is employed that integrates CWT-based image formation with a 1-D convolutional transformer employing sketching techniques [5]. It preserves local structure through 1-D convolutions, embeds time–frequency patches into sequence tokens with learnable positional encodings, and applies a sketch-based attention mechanism that reduces complexity. This combination enables efficient and accurate RUL estimation on the NASA Bearing Dataset.

II. Proposed Method

Given a vibration signal $x(t)$ of length L, the Continuous Wavelet Transform coefficients are computed as

$$W_x(s,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)\, \boldsymbol{\psi}^*\left(\frac{\tau - t}{s}\right) d\tau, \tag{1}$$

where $\boldsymbol{\psi}$ is the chosen mother wavelet and s is the scale parameter. The squared magnitude $W_x(s,t)^2$ forms a two-dimensional matrix $I \in R^{L \times S}$, which is treated as an image. The CWT image I is

divided into non-overlapping patches of size $p \times p$, each flattened and linearly projected into a d-dimensional embedding:

$$z_i = E\overrightarrow{P_i} + PE_{:,i}, \tag{2}$$

where $E \in R^{p^2 \times d}$ is the patch projection matrix, P_i is the i-th patch, and $PE_{:,i} \in R^{d \times N}$ represents learned positional encodings for N patches.

Considering that the kernel's power is equal to 4 and learnable matrices $G_1, G_2 \in R^d$ used for a fine-tuned dimensionality reduction to preserve features from an original similarity function $sim(q, k^T)$ and initialized as a normal standard distribution to guarantee an admissible error in Frobenius norm, a sketched matrix $x_i \in R^d$ can be described as follows:

$$\varphi(x_i) = \sqrt{r}\tanh\left(\frac{(x_i G_1) \odot (x_i G_2)}{\sqrt{r}}\right), \tag{3}$$

where r represents a lower-dimensional sketch space. A $\tanh(\cdot)$ trick is applied to make the convergence process more stable during training [6]. A $\odot$ sign denotes Hadamard product which allows us to approximate a ground-truth tensor. Normalization by $1/\sqrt{r}$ means that the variance of each component is preserved in the order it appears. Finally, attention scores and output can be computed as:

$$y_i = \sum_{j=0}^{i} \varphi(Q_i)\varphi(K_j)\, V_j / \sum_{n=0}^{i} \varphi(Q_i)\varphi(K_n) \tag{4}$$

Outputs from all heads are concatenated and linearly projected back to d features. The attention block is followed by residual connections, layer normalization, and a two-layer feed-forward network with GELU activation, as in the standard transformer encoder (Fig.1).

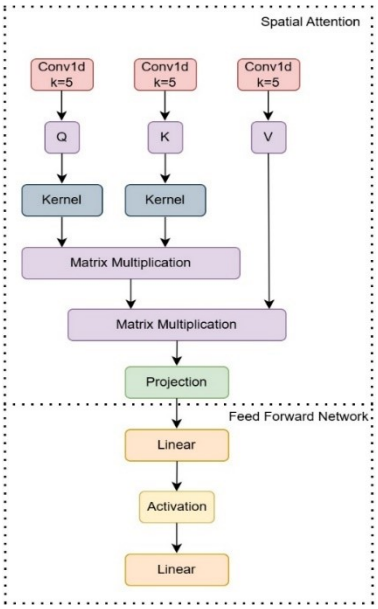


Fig.1. A Multi-Head Attention layer

III. Conclusion

A hybrid method combining CWT-based image representations with an efficient 1-D convolutional transformer employing sketch-based attention has been introduced. By leveraging learnable positional encodings, 1-D convolutions and sketch-projected attention kernels, the method attains reduced complexity in the sketch dimension while preserving local temporal–frequency structure. Experiments on the NASA Bearing Dataset were run to transform data into the 2-D image input with power spectra to find alternative ways to make RUL predictions.

References

[1] *Yoo, Y., Baek, J.-G. A* Novel Image Feature for the Remaining Useful Lifetime Prediction of Bearings Based on Continuous Wavelet Transform and Convolutional Neural Network // *Appl. Sci*. – 2018. – Vol. 8, No. 7. – Art. 1102.

[2] *Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., Polosukhin, I.* Attention Is All You Need // *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008.

[3] *Mehta, S., Rastegari, M., Caspi, A., Shapiro, L., Hajishirzi, H.* MobileViT: Light-weight, General-purpose, and Mobile-friendly Vision Transformer // arXiv:2110.02178. – 2021. – 8 p. [4] Wang, S., Li, B. Z., Khabsa, M., Fang, H., Ma, H. Linformer: Self-Attention with Linear Complexity // arXiv:2006.04768. – 2020. – 12 p.

[5] *Pham, N., Pagh, R.* Fast and Scalable Polynomial Kernels via Explicit Feature Maps // Proc. of the 19th ACM SIGKDD *International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* – 2013. – P. 239–247.

[6] *Li, W., Meng, S., Nguyen, H., Zhang, X.* PolySketchFormer: Efficient Transformer Attention via Polynomial Sketching // arXiv:2401.01234. – 2024. – 21 p.

Using Gazebo simulator for mobile robotics research: a case study of a crawler robot model development

A. Dobrokvashina, T. Gamberov, R. Lavrenov, T. Tsoy
Kazan Federal University, 35, Kazan, Russia,
dobrokvashina@it.kfu.ru, timycho2@it.kfu.ru, lavrenov@it.kfu.ru, tt@it.kfu.ru

***Abstract**. This article explains a quick way to create a Gazebo simulation model for a crawler robot for rough terrains traversal and typical search and rescue missions. It provides a simple guide for robot operating system (ROS) users with key steps to build a realistic virtual model. The paper contains tips on improving 3D models, setting physics and adding sensors while focusing on practical recommendations for making accurate collision meshes, adjusting weight settings, and configuring ROS for robot's movement and tools. We addressed common challenges that appear during modeling crawler robots such as simulating tracks and maintaining overall robot balance. This guide should be helpful for researchers and developers looking for ways to create accurate simulation models for crawler-type robots in ROS/Gazebo.*

I. Introduction

Robotic systems are becoming more complex in terms of their hardware and software components. Robots are being used in all sorts of areas of our life lately. They are broadly presented in factories for automation [1,2], in hospitals for medical help [3,4], during search and rescue missions [5,6], in self-driving cars [7,8] and other practical applications. They handle everything from routine tasks in factories to exploring dangerous places [9]. Today, a key part of building and testing a robot is simulation [10]. It gives researchers a way to try out algorithms and assess safety measures in a safe virtual space before sending them out into the real world [11].

Creating accurate simulation models is important in robotics research, especially for crawler type robots [12]. Tracked vehicles interact with different uneven terrains in vital circumstances [13]. This paper outlines a method for building detailed crawler robot simulations in Gazebo. As an example we used a model of the Russian crawler type robot Servosila Engineer (Fig. 1) [14]. The research is focuses on three main issues: organizing ROS projects so that simulations are easy to maintain; techniques for physical and visual modeling; control implementation and sensors' setups that match real robot hardware. Our approach gives a reference implementation that's been tested against real-world performance.

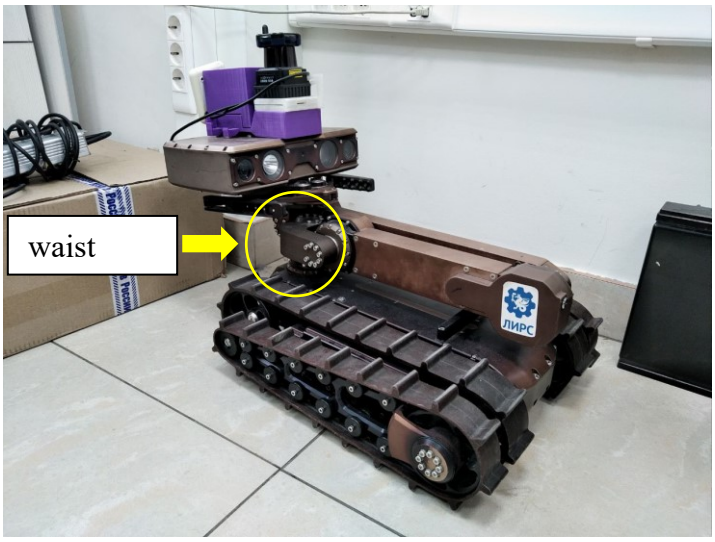


Fig.1. Servosila Engineer crawler robot, Kazan Federal University

II. Project and packages hierarchy

The proposed project is a setup with a clear structure of different ROS packages, each serving a specific purpose in the simulation setup. This way of organizing makes it easier to develop while keeping a system working properly. The main blocks include three key packages. Package "*<robot_name>_description*" contains data related to the robot's structure, e.g., URDF/Xacro files that outline robot's outlook and behavior. It stores all visual and collision mesh files in standard 3D formats. In most cases it also contains RViz config files for visualizing a model. For the simulation side, the "*<robot_name>_gazebo*" package has everything needed by Gazebo, i.e., world definition files and launch files for the simulation to start. Lastly, package "*<robot_name>_control*" covers a control setup; it includes configurations for controllers (like PID settings and hardware interface details) and helps to ensure that the virtual robot behavior in the simulation matches the real robot. This package also runs loading of controllers and transitions between different operational modes. If needed, more packages can be added for extra features, e.g., teleoperation and navigation modules.

Each of the abovementioned packages has a standard ROS-package hierarchy, i.e., separate folders for launch files, for source code and optional for meshes, media or config data. All ROS packages contain two files: *CMakeList.txt* and *package.xml*. These two files contain information about the package itself and about dependencies it uses. They could be generated automatically during creation of the package with terminal command "*catkin_create_pkg*" but should be checked afterwards at least to update information about the package.

III. Model description

Main data about the robot and its construction is presented in the "*<robot_name>_description*" package, including 3D models and URDF files, which give system information about a way to connect these models together. At the same time, there should be visual and collision meshes among the models.

Visual meshes are used to demonstrate visually attractive activities in the simulated environment. The meshes could contain UV-maps and textures to make them look exactly as real robot's parts. In most cases visual meshes could be provided by manufacturers that had developed the robot; otherwise, they should be created manually based on visual appearance of the robot.

Collision meshes are another view of the robot model; these are rarely provided by manufacturers. Simulators use the collision meshes to calculate physics, collisions, inertias etc. For this reason they should not be too difficult but should stay accurate. Creating such meshes is one of the first main tasks in order to create a simulation model. There are two ways to create the collision meshes: auto-generation and manual construction. Automatic generation of the collision meshes could be performed by various addons that could decrease a number of polygons of visual meshes. These of addons could be found in different 3D programs, e.g., "decimate" modifier in Blender [15].

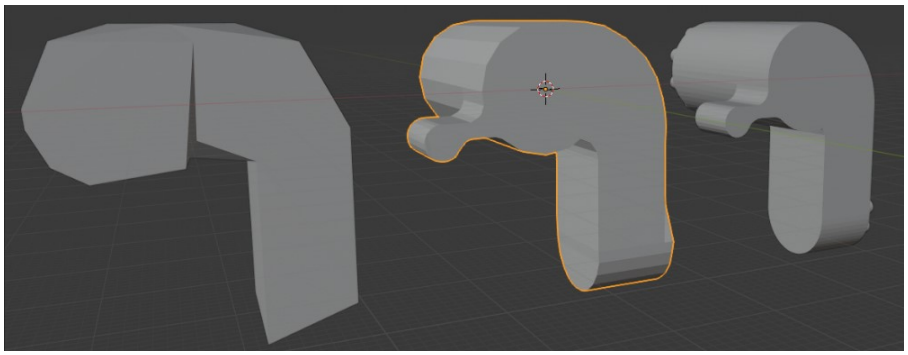


Fig.2. Mesh examples: original visual mesh of a robot's waist joint (right), manually created (middle) and auto-generated collision mesh (left)

The result of the auto-generation is not always the best solution so a better option is to construct collision meshes manually. Fig. 2 presents a comparison of the visual and two types of the collision meshes of the waist joint, shown in Fig.1 within the yellow circle.

IV. Conclusions

This paper briefly presented a framework for developing a crawler robot model for the Gazebo simulator demonstrated with a Servosila Engineer robot construction case study. The structured project hierarchy promotes maintainability and collaborative development, while the detailed modeling approach ensures physical accuracy. The resulting model serves as a reliable simulation project that could be used for algorithms' development and testing.

Acknowledgement

The reported study was funded by the Russian Science Foundation (RSF) according to the research project No. 24-29-00564.

References

[1] A. Buerkle, W. Eaton, A. Al-Yacoub, M. Zimmer, P. Kinnell, M. Henshaw, M. Coombes, W.-H. Chen, N. Lohse, "Towards industrial robots as a service (iraas): flexibility, usability, safety and business models", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 81, 2023, p. 102484.

[2] R. Sultanov, S. Sulaiman, H. Li, R. Meshcheryakov, E. Magid, "A review on collaborative robots used in industrial and service sectors", Siberian Conference on Control and Communications, 2022, pp. 1-7.

[3] C. Di Napoli, G. Ercolano, S. Rossi, "Personalized home-care support for the elderly: a field experience with a social robot at home", User Modeling and User-Adapted Interaction 33(2), 2023, pp. 405–440.

[4] H. Li, X. Nie, D. Duan, Y. Li, J. Zhang, M. Zhou, E. Magid, "An admittance-controlled amplified force tracking scheme for collaborative lumbar puncture surgical robot system", International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 18(5), 2022, e2428.

[5] B. Pillai, J. Suthakorn, D. Sivaraman, S. Nakdhamabhorn, N. Nillahoot, S. Ongwattanakul, F. Matsuno, M. Svinin, E. Magid, "A heterogeneous robots collaboration for safety, security, and rescue robotics: e-ASIA joint research program for disaster risk and reduction management", Advanced Robotics 38(3), 2024, pp. 129-151.

[6] F. Matsuno, "Snake robots and their applications in harsh environments – a review", 2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2025, pp. 1-6.

[7] X. Lv, Z. Gao, H. Xue, Z. Meng, W. Li, "Unmanned self-driving car based on the ROS system", Journal of Physics: Conference Series 2936(1), 2025, p. 012019.

[8] D. Imameev, A. Zakiev, E. Magid, E. Martinez-Garcia, H. Li, "Modelling autonomous perpendicular parking procedure for car-like robot Avrora Unior in Gazebo simulator", 2022 International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), 2022, pp. 1-4.

[9] J. Horyna, T. Baca, V. Walter, D. Albani, D. Hert, E. Ferrante, M. Saska, "Decentralized swarms of unmanned aerial vehicles for search and rescue operations without explicit communication", Autonomous Robots 47, 2023, pp. 77–93.

[10] E. Magid, "Simulation tools for urban search and rescue robotics", International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2023), 2023, pp. 4-11.

[11] N. Hung, F. Rego, J. Quintas, J. Cruz, M. Jacinto, D. Souto, A. Potes, L. Sebastiao, A. Pascoal, "A review of path following control strategies for autonomous robotic vehicles: theory, simulations, and experiments", Journal of Field Robotics 40(3), 2023, pp. 747–779.

[12] M. Pecka, K. Zimmermann, T. Svoboda, "Fast simulation of vehicles with non-deformable tracks", 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017, pp. 6414-6419.

[13] E. Magid, T. Tsubouchi, "Static balance for rescue robot navigation: discretizing rotational motion within random step environment", Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. SIMPAR 2010. Lecture Notes in Computer Science 6472, 2010, pp. 423-435.

[14] R. Gabdrahmanov, T. Tsoy, Y. Bai, M. Svinin, E. Magid, "Gear wheels based simulation of crawlers for mobile robot Servosila Engineer", Proceedings of the 19th International Conference in Control, Automation and Robotics ICINCO, 2022, pp. 565-572.

[15] R. Hess, The essential Blender: guide to 3D creation with the open source suite Blender. No Starch Press, 2007, 376p.

Digital human modeling for computer vision algorithms evaluation in Gazebo: a case study on human tracking

T. R. Gamberov[1], R. N. Safin[1], E. V. Chebotareva[1],
T. G. Tsoy[1], M. M. Svinin[2], E. A. Magid[1,3]
[1]Kazan Federal University, Kazan, Russia,
[2]Ritsumeikan University, Kyoto, Japan,
[3]HSE University, Moscow, Russia
timycho2@it.kfu.ru, safin.ramil@it.kfu.ru, elvira.chebotareva@kpfu.ru,
tt@it.kfu.ru, magid@it.kfu.ru, svinin@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract. *Digital human models (DHMs) offer a cost-effective and reproducible solution for evaluating computer vision algorithms in robotics, particularly in human tracking and following tasks. However, existing simulation environments often lack diversity and realism needed to thoroughly test such algorithms under varied conditions. In this work, we address this gap by introducing a set of customizable DHMs integrated into the Gazebo simulator, featuring diverse clothing types and dynamic walking animations. We evaluate effectiveness of these models using a differential drive robot equipped with a LiDAR and a monocular camera, implementing human tracking and following algorithm in a simulated office environment. Within virtual experiments we measured an average tracked distance and a track loss count. This work highlights the potential of DHMs for reproducible and scalable evaluation of vision-based algorithms, paving a way for more reliable robotic applications in dynamic human populated environments.*

I. Introduction

Computer vision plays a crucial role in robotics and automation, enabling systems to detect, track, and interpret human presence and behavior [1]. From an autonomous navigation in crowded environments [2] to a human-robot collaboration in industrial settings [3], accurate human modeling is essential for robust vision-based perception. For instance, in Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), human tracking allows robots to differentiate between dynamic and static objects, improving map accuracy and preventing a localization drift [4]. Similarly, in warehouse automation, robots rely on a human detection and a trajectory prediction to navigate safely around workers, optimizing efficiency and minimizing collisions [5]. However, real-world algorithm evaluation faces challenges: high costs, safety risks, and ethical constraints limit data collection, while environmental complexity complicates testing.

Digital human models (DHMs) in simulators like Gazebo [6] offer a scalable alternative for validating vision algorithms under diverse conditions. Simulators (e.g., Gazebo or Webots [7]) provide a cost-effective platform for integrating DHMs, which serve as virtual representations of people. These models facilitate a systematic validation of vision-based algorithms under diverse conditions, including pose estimation [8], action recognition [9], object occlusion handling [10], and tracking [11]. Yet current DHMs lack realism and variability needed for robust evaluation in dynamic environments.

In our work, we address this gap by introducing a set of detailed and customizable DHMs designed for evaluating human tracking and following algorithms in Gazebo. Our models incorporate diverse clothing types (e.g., pants, skirts, long dresses) and walking animations (e.g., straight paths, zig-zag patterns, 90-degree turns), enabling comprehensive testing under varied conditions. We validate our approach by using existing human tracking and following algorithm on a differential drive robot equipped with a LiDAR and a camera. Our experiments demonstrate the effectiveness of DHMs in simulating real-world challenges, such as occlusions and dynamic obstacles.

II. Experimental Setup

We evaluated robustness of human tracking algorithms using sensor fusion (LiDAR and camera) from Chebotareva et al. [5] employed with a virtual TIAGo Base robot in ROS/Gazebo. Tests were conducted in a virtual office environment featuring different path types, clothing variations, and DHMs

with walking animations. The target DHM follows predefined paths, including a straight path (walking straight down a corridor), a zig-zag path (moving in a zig-zag pattern to simulate an evasive behavior), and 90-degree turns (entering a room to test a robot's ability to handle abrupt changes in a motion direction).

Fig.1. Virtual environment featuring a target DHM wearing green clothing and an obstacle DHM wearing orange clothing. The obstacle model moves according to a predefined script within the corridor and rooms, simulating the presence of coworkers or pedestrians. The figure demonstrates original Gazebo DHMs from the original algorithm experiments [5], which were replaced by our improved DHMs in the current study.

III. Results

The performance of the human tracking and following algorithm was evaluated using the average traveled distance and tracker's false positives. The DHM-following algorithm's accuracy score was computed according to the equation from [5]. Experimental results demonstrate significant variations in the algorithm's performance depending on clothing type and path pattern. For pants wearing models, the algorithm performed best on straight paths, successfully tracking the target for 59% of a path distance. Performance dropped sharply on zig-zag paths, covering only 24% of the path, but showed surprising resilience in handling 90-degree turns with 84% success. Skirt-wearing models yielded the best straight-path performance at 62% tracking, but proved particularly challenging for the algorithm during turns, with only 41% success. Zig-zag paths remained difficult at 35% coverage. Long dresses presented consistent challenges, with straight-path tracking at 58%, zig-zag performance dropping to just 22% coverage (the worst of all scenarios), and showing moderate turn-handling capability at 77%.

Across all clothing types, straight paths proved most reliable, while zig-zag paths were consistently the most challenging. The algorithm's ability to handle sharp turns varied significantly by clothing type, performing well with pants but poorly with skirts. The combination of zig-zag paths with long dresses emerged as the most difficult scenario for the tracking algorithm, highlighting specific limitations in handling complex clothing during non-linear motion.

IV. Conclusion

This study evaluated the performance of human tracking and following algorithm using DHMs in a simulated office environment. The experiments tested the algorithm across diverse clothing types (pants, a skirt, a long dress) and path types (straight, zig-zag, 90-degree turn), while measuring an average distance tracked, a track loss count, and an accuracy score.

Acknowledgement

The reported study was funded by the Russian Science Foundation (RSF) according to the research project No. 24-29-00564.

References

[1] *K. Chen, D. Zhang, L. Yao, B. Guo, Z. Yu, Y. Liu*, "Deep learning for sensor-based human activity recognition: Overview, challenges, and opportunities", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(4),2021, pp. 1–40.

[2] *L. Liu, D. Dugas, G. Cesari, R. Siegwart, R. Dubé*, "Robot navigation in crowded environments using deep reinforcement learning", 2020 IEEE/RSJ *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2020, pp. 5671–5677.

[3] *E. Chebotareva, M. Mustafin, R. Safin, T. Tsoy*, "Camera-based safety system for collaborative assembly", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024, pp. 1–19.

[4] *H. Bavle, J. L. Sanchez-Lopez, C. Cimarelli, A. Tourani, H. Voos,* "From SLAM to situational awareness: Challenges and survey", *Sensors,* 23(10), 2023, p. 4849.

[5] *E. Chebotareva, K.-H. Hsia, K. Yakovlev, E. Magid*, "Laser rangefinder and monocular camera data fusion for human-following algorithm by PMB-2 mobile robot in simulated Gazebo environment", Smart Innovation, *Systems and Technologies,* 187, 2021, pp. 357–369.

[6] *L. Fortini, M. Leonori, J. M. Gandarias, E. De Momi, A. Ajoudani*, "Open-VICO: An open-source Gazebo toolkit for vision-based skeleton tracking in human-robot collaboration", *2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2022, pp. 511–517.

[7] *D. E. Diamantis, P. G. Kalozoumis, D. K. Iakovidis*, "Digital twin for simulation and evaluation of assistive navigation systems", *Digital Twins for Digital Transformation: Innovation in Industry. Studies in Systems, Decision and Control*, 423, 2022, pp. 147–170.

[8] *J. Wang, S. Tan, X. Zhen, S. Xu, F. Zheng, Z. He, L. Shao*, "Deep 3D human pose estimation: A review", *Computer Vision and Image Understanding*, 210, 2021, p.103225.

[9] *M. Y. Yin, J. G. Li*, "A systematic review on digital human models in assembly process planning", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 2023, pp. 1037–1059.

[10] *H. O. Demirel, S. Ahmed, V. G. Duffy*, "Digital human modeling: A review and reappraisal of origins, present, and expected future methods for representing humans computationally", *International Journal of Human–Computer Interaction*, 38(10), 2022, pp. 897–937.

Optimization of random step environment structure generation for LIRS-RSEGen-2 in the Gazebo simulator

R. Gabdrahmanov[1], A. Zagirov[1], T. Tsoy[1], E. A. Martinez-Garcia[2], E. Magid[1,3]
[1]Kazan Federal University, Kazan, Russia,
[2]Autonomous University of Ciudad Juarez, Cd Juarez, Mexico,
[3]HSE University, Moscow, Russia,
ruslan3452364@yandex.ru, {ai.zag, tt}@it.kfu.ru,
edmartin@uacj.mx, magid@it.kfu.ru

Abstract. *Modelling and simulation in robotics are widely used for various tasks, including development, testing, demonstrations, and training. One of the most important components of simulation, along with a robot model, is a model of an environment in which the robot operates. Performance of an environment determines performance and correctness of an entire simulation process. This article discusses methods for optimizing an environment based on regular geometric shapes created using a generative algorithm with the LIRS-RSEGen random step environment (RSE) generator as a case study. The research targets to achieve better performance of a generated environment while examining optimization methods that reduce overall computational complexity.*

I. Introduction

At the time of writing this paper, simulation has become a part of the standard development process in robotics [1]. One of the main parameters of computer simulation is its performance [2]. Better performance leads to faster experiments and faster development, thus it is viable for both scientific research and industrial R&D [3]. Since ideal performance is considered to be hardly achievable, iterative improvement of performance through extensive optimization is a reasonable option.

Numerous simulation engines were reported to be resource-efficient [4][5] and concentrated on optimization of a robot model. On the other hand, optimization of environment models remains uncovered and mostly consists of basic recommendations, such as avoiding too complex environments usage or implementing only those features, which are important for a specific case study. Optimization of environment models has been overlooked in robotics for a reason: after spending enduring time and efforts to optimize a single environment model, only that specific model would show better performance; in a long term (when this particular model becomes irrelevant), such approach is a waste of valuable resources. Moreover, single or few environment models are not enough to gather credible statistics and evaluate effectiveness of some approach or algorithm with virtual experiments. However, an idea of optimizing an entire class of environmental models (e.g., by providing a tool that generates such optimized models) is worth considering.

This paper describes a modification of LIRS-RSEGen-2 [6], which is a generator of urban search and rescue (USAR) environments for mobile ground robots' mobility and path planning capabilities' testing. Virtual environments are constructed using the random step environment (RSE) modelling standard [7]. The proposed in this paper modification increases overall performance, which was demonstrated with validation experiments in virtual worlds of the Gazebo simulator [8].

II. LIRS-RSEGen-2 modification

RSE is an approximating model of a USAR environment, which simulates an underlying surface (e.g., a floor or stairs) of a damaged building covered with debris; debris are represented by a set of blocks of various heights [7]. It is used to evaluate mobility performance of ground vehicles in a USAR environment due to its simplicity, repeatability, and adaptability. LIRS-RSEGen-2 is an open-source tool capable of simultaneously generating a large number of varying virtual RSE models. It has a broad selection of settings to configure a RSE structure in a human-readable way and includes randomization features.

Computational complexity of a single static virtual model of any object or environment is mostly determined by a number of elementary segments; the segments are mesh forming triangles, which may

be incorrectly referred to as polygons, though they are not the same. This statement applies to both visual and collision computations. Therefore, the most obvious way to create a more optimized environment is to reduce a total number of mesh triangles in an environment model.

An original generation algorithm of LIRS-RSEGen-2 creates a single cuboid shape per each RSE block. This approach is simple and high-level, making it easy to implement. However, in terms of optimization it is inefficient. A bottom face of each cuboid, which faces the ground plane, is useless for virtual experiments since a robot never contacts it (Fig. 1, left) and thus could be removed. Moreover, side faces of cuboids could also be removed if they are fully covered by an adjacent cuboids. A texture resolution can be reduced as well. Applying the abovementioned optimizations, a total number of triangles could be reduced by at least 50%, averaging around 66% for complex structures (e.g., as in Fig. 1, right). Consequently, this reduces a number of collision calculations and improve simulation speed.

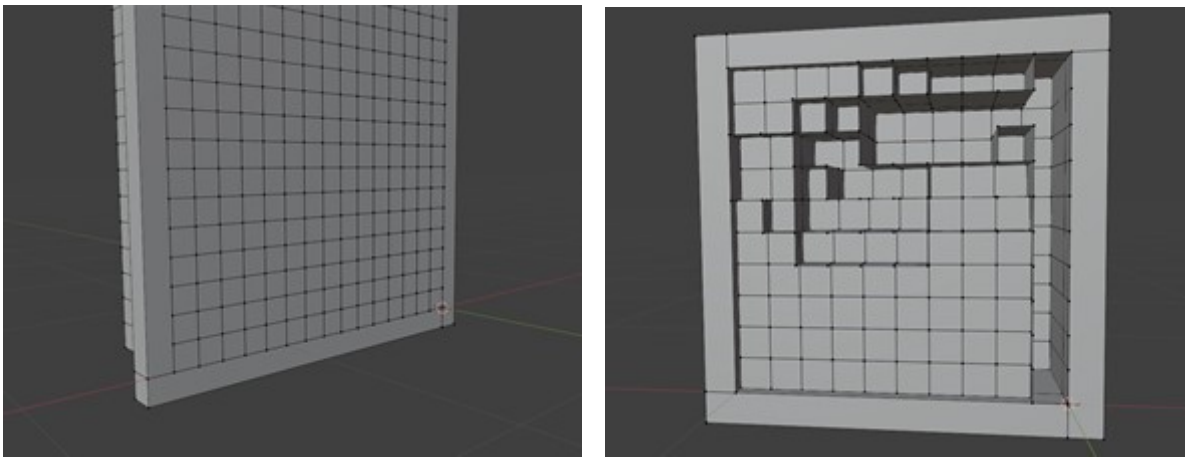


Fig.1. A view of a RSE model from below before modifications (left)
and after modifications (right)

To measure a performance impact of the proposed optimization, a series of virtual tests were performed in the Gazebo simulator with two existing robot models: a complex model with heavy resource consumption (Servosila Engineer crawler robot [9]) and a group of three simple robots (TurtleBot3 [10]). Three sizes of RSEs were considered: 10×10, 15×60 and 50×50 RSE cuboid blocks of varying height. Five original and five optimized RSE models for each size were tested with Servosila Engineer and three TurtleBot3 robots in a simple straight line motion task resulting in 60 trials in total. Each run was limited to one minute.

The virtual test results are summarized in Table 1. The first column contains a robot model, the second – a RSE size in a number of cuboid blocks. As a performance measurement we used the real time factor (RTF) of Gazebo, which represents a simulation speed compared to a real-time speed (i.e., higher RTF values are preferable). Original RTF of LIRS-RSEGen-2 is presented in the third column and the RTF of optimized RSE appears in the last column. Min and max in the third and fourth columns are the minimum and maximum RTFs detected within each run, which were averaged over all runs for a given model and RSE size class.

Table 1. Performance measurements

Robot model	RSE size X×Y	Original RTF Min-Max	Optimized RTF Min-Max
Servosila Engineer	10×10	0.69-0.85	0.70-0.87
	15×60	0.58-0.74	0.62-0.78
	50×50	0.42-0.57	0.47-0.62
Turtlebot3 x 3	10×10	0.99-1	0.99-1
	15×60	0.98-1	0.98-1
	50×50	0.96-1	0.97-1

The table demonstrates that the optimization affected larger 50x50 models in a more significant way, with an RTF increase of around 10%, while smaller 10x10 models were almost unaffected having an average increase of around 2%. CPU load was almost unaffected and stayed within 6 (for 10x10 size

models) to 7% (for larger models), showing almost 100% load on a single core in all runs; GPU and RAM load remained nearly the same for all runs.

III. Conclusions

In this research, we presented a modification of a previously proposed LIRS-RSEGen-2 tool for RSE models' generation. The modification simplifies RSE models by reducing a number of mesh triangles, which causes less computations. The optimized approach was tested against the original tool within a set of 60 tests that involved three sizes of RSEs and two models of mobile robots in the Gazebo simulator. The simulation performance was measured in terms of resource consumption and real time factor (RTF). While the resource consumption was not affected by the proposed optimization, a positive change in RTF was notable and consistent. An obtained RTF boost of up to 10% is not significant for traditional low-loaded simulations with a few iterations, e.g., demonstrations or algorithm testing. However, for simulations involving machine learning and other approaches that require a huge number of iterations, this could be a valuable improvement.

Acknowledgement

The reported study was funded by the Tatarstan Academy of Sciences research grant for young candidates of science aiming to defend a doctoral dissertation, to carry out scientific research and to work in research and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan".

References

[1] *C. K. Liu, D. Negrut*, "The role of physics-based simulators in robotics", *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4, 2021, pp. 35-58.

[2] *H. Choi, C. Crump, C. Duriez, A. Elmquist, G. Hager, D. Han, F. Hearl, J. Hodgins, A. Jain, F. Leve, C. Li, F. Meier, D. Negrut, L. Righetti, A. Rodriguez, J. Tan, J. Trinkle*, "On the use of simulation in robotics: Opportunities, challenges, and suggestions for moving forward", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(1), 2021, e1907856118.

[3] *J. Collins, S. Chand, A. Vanderkop, D. Howard*, "A review of physics simulators for robotic applications", IEEE Access 9, 2021, pp. 51416-51431.

[4] *V. Makoviychuk, L. Wawrzyniak, Y. Guo, M. Lu, K. Storey, M. Macklin, D. Hoeller, N. Rudin, A. Allshire, A. Handa, G. State*, "Isaac gym: High performance gpu-based physics simulation for robot learning", arXiv preprint, 2021.

[5] *A. Farley, J. Wang, J. A. Marshall*, "How to pick a mobile robot simulator: a quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion", *Simulation Modelling Practice and Theory* 120, 2022, p. 102629.

[6] *R. Gabdrahmanov, E. Magid, T. Tsoy, E. Martínez-García*, "A tool for mass generation of random step environment models with user-defined landscape features", *Proceedings of the 21st International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)* 1, 2024, pp. 511-518.

[7] *A. Jacoff, A. Downs, A. M. Virts, E. Messina*, "Stepfield pallets: Repeatable terrain for evaluating robot mobility", *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, 2007, pp 29-34.

[8] *N. Koenig, A. Howard*, "Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator", 2004 IEEE/RSJ *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* 3, 2004, pp. 2149-2154.

[9] *R. Gabdrahmanov, T. Tsoy, Y. Bai, M. Svinin, E. Magid*, "Gear Wheels based Simulation of Crawlers for Mobile Robot Servosila Engineer", *Proceedings of the 19th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 2022, pp. 565-572.

[10] *R. Amsters, P. Slaets*, "Turtlebot 3 as a robotics education platform", In: M. Merdan, W. Lepuschitz, G. Koppensteiner, R. Balogh, D. Obdržálek (eds.), Robotics in Education. Advances in Intelligent Systems and Computing 1023, 2020, pp. 170-181.

Modelling and dynamic analysis of a humanoid robot with the Denavit-Hartenberg method

S. Sulaiman[1], N. Imamov[2], A. P. Sudheer[3], T. Tsoy[2]
[1]University of Aalborg, Aalborg, Denmark,
[2] Kazan Federal University, Kazan, Russia,
[3]National Institute of Technology, Calicut, India,
ssajmech@gmail.com, NFImamov@it.kfu.ru, tt@it.kfu.ru, apsudheer@nitc.ac.in

Abstract. *Humanoid robots serve diverse applications, including training, personal assistance, healthcare, entertainment, rescue operations, and space exploration. A crucial aspect of their development is kinematic analysis, which defines motion capabilities and structural feasibility of these robots. This paper presents kinematic and dynamic modellings of a humanoid upper-body robot. A forward kinematic model is determined using the Denavit-Hartenberg (DH) method, which simplifies joint parameterization and enhances computational efficiency. A dynamic modelling is performed through the Euler-Lagrange method, enabling precise motion control and stability assessment. Proposed torso and arm design of the humanoid robot effectively mimic human postures, providing enhanced interactions and adaptability in various operational scenarios.*

I. Introduction

Humanoid robots serve diverse applications, including training [1], personal assistance [2], healthcare [3], entertainment [4], rescue operations [5], and space exploration [6]. A humanoid robot [7] (Fig.1) is designed to resemble and emulate human movements, interactions, and behaviors [8]. The humanoid with dual arms is featured with 3 degrees of freedom (Dof) in a torso, 2 Dof in a neck, and 5 Dof in each arm. Both arms share identical joint configurations to facilitate balanced and symmetrical functionality. The integration of Denavit-Hartenberg (DH) based kinematic modelling [9] with Euler-Lagrange [10] based dynamic analysis contributes to motion accuracy and workspace efficiency evaluation. This approach supports humanoid robotics research, focusing on realistic human-like motion and broader applications in autonomous and assistive technologies.

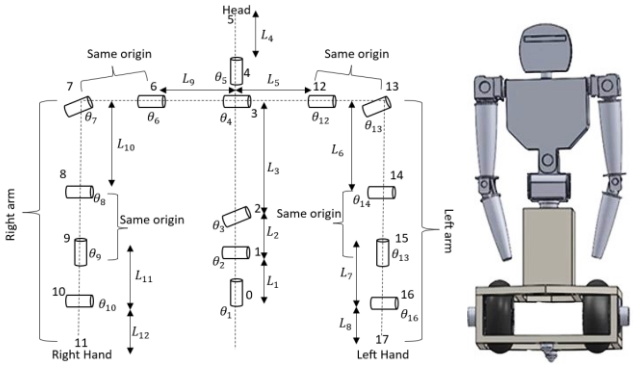


Fig.1. Humanoid robot (a) Joints (b) CAD model

In Fig.1, joints and lengths of the humanoid robot links are represented as $\theta_1, \theta_2, \ldots . \theta_{15}$ and $L_1, L_2, \ldots, L_{12}$ respectively. The dimensions of the robot were determined based on a 5 feet tall human body proportions. Links 6 and 7, 8 and 9, 12 and 13, as well as 14 and 15 are assumed to be in the same origin.

II. Kinematic modelling of the robot

Kinematic modelling [11],[12] is a fundamental aspect of a humanoid robot design, enabling precise motion planning and control. The DH method is widely used due to its systematic approach in parameterizing robotic joints. By simplifying complex robotic structures into a set of standardized transformations, the DH method enhances computational efficiency and ensures accurate trajectory

planning. It provides a structured framework to represent joint relationships, facilitating seamless integration with control algorithms. Additionally, the DH method minimizes computational overhead and aids in identifying singularities, making it a reliable choice for optimizing workspace and mobility of humanoid robots. Its ability to streamline kinematic calculations makes it indispensable for achieving human-like movement [13] and stability in various applications, from assistive technologies to advanced robotic automation. The structure of the humanoid is divided into 3 branches for modelling. The first branch consisted of joints from the hip and neck, and considered head as the end effector. The second and third branches consisted of right and left arms' joints respectively. The second and third branches considered hands as the end effectors. Location of the first joint of the hip is considered as a base frame for all branches. The DH modelling parameters of 3 branches are given in tables 1-3.

The transformation of head (T_0^5) with respect to base frame is given in equation (1)

$$T_0^5 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 \tag{1}$$

The transformation of left and right hands with respect to the base frame are given in equations (2) and (3) respectively

$$T_0^{17} = T_0^{12} T_{12}^{13} T_{13}^{14} T_{14}^{15} T_{15}^{16} T_{16}^{17} \tag{2}$$

$$T_0^{11} = T_0^6 T_6^7 T_7^8 T_8^9 T_9^{10} T_{10}^{11} \tag{3}$$

Table 1. DH parameters of the first branch

Frames	θ_{i+1}	d_{i+1}	a_{i+1}	α_{i+1}
1	θ_1	L_1	0	-90
2	θ_2-90	0	L_2	-90
3	θ_3	0	L_3	90
4	θ_4+90	0	0	90
5	θ_5	0	0	0

Table 2. DH parameters of the second branch

Frames	θ_{i+1}	d_{i+1}	a_{i+1}	α_{i+1}
6	θ_6	0	0	90
7	θ_7+180	0	L_6	-45
8	θ_8	0	0	-90
9	θ_9-90	L_7	0	90
10	θ_{10}+90	0	L_8	0

Table 3. DH parameters of the third branch

Frames	θ_{i+1}	d_{i+1}	a_{i+1}	α_{i+1}
11	θ_{11}+180	0	0	90
12	θ_{12}	0	L_{10}	45
13	θ_{13}+90	0	0	90
14	θ_{14}	L_{11}	0	-90
15	θ_{15}+90	0	L_{12}	0

III. Dynamic modelling of the humanoid robot

The Euler-Lagrange method [14], [15] is an approach used for deriving motion equations for an n-Dof robotic arm. For the humanoid, we define a set of generalized coordinates $q = [q_1, q_2, \dots\dots, q_n]^T$, which typically represent joint angles of a robot. Kinetic energy is given in equation (4)

$$T = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} \tag{4}$$

where $M(q)$ is a mass/inertia matrix, which depends on a configuration of the robot and $\dot{q}$ is a vector of generalized velocities. Potential energy typically comes from gravitational forces and is given in equation (5)

$$V = \sum_{i=1}^{n} m_i g h_i(q) \tag{5}$$

where m_i is a mass of the i^{th} link, g is the gravitational acceleration, $h_i(q)$ is a height of the i^{th} link. The Lagrangian function is defined as:

$$L = T - V \tag{6}$$

The equation governing the humanoid dynamics is given as follows:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i, i = 1,2,3 \dots \dots n \tag{7}$$

where τ_i represents generalized forces or torques acting on the joints. Expanding the Euler-Lagrange equation results as follows:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \tag{8}$$

where $C(q,\dot{q})$ represents Coriolis and centrifugal forces, $G(q)$ represents gravitational forces, and τ is the control input (forces or torques applied). Equation (8) serves as the foundation for determining a range of torques acting on the robot's joints. The analysis revealed that the torque values fall within the range of 2 Nm to 6 Nm, ensuring efficient and stable joint operations. These torque values play a crucial role in a selection of suitable actuators, as they directly influence motor specifications required to drive the joints. To enhance reliability and accommodate unforeseen variations in operational loads, a safety factor of 2 is incorporated into the motor selection process. This safety margin accounts for dynamic effects, external disturbances, and uncertainties in real-world applications, ensuring durability and performance of the humanoid robot in diverse environments. The systematic approach to torque evaluation and motor selection contributes to the overall stability and functional accuracy of the robotic system, making it well-suited for applications requiring precise motion control and adaptability [16].

IV. Conclusions

Kinematic and dynamic modelling of a humanoid robot were presented in this paper. Kinematic analysis was employed to determine dexterity of the arms. Forces acting on the robot during motions were evaluated using dynamic modelling.

References

[1] *K. Khusnutdinov, A. Sagitov, A. Yakupov, R. Meshcheryakov, K.-H. Hsia, E. A. Martinez-Garcia, E. Magid*, "Development and implementation of grasp algorithm for humanoid robot AR-601M", *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2, 2019, pp.379-386.

[2] *K. Khusnutdinov, A. Sagitov, A. Yakupov, R. Lavrenov, E. A. Martinez-Garcia, K.-H. Hsia, E. Magid*, "Household objects pick and place task for AR-601M humanoid robot", *Lecture Notes in Computer Science*, 11659, 2019, pp.139-149.

[3] *S. Feng, N. Yamato, H. Ishiguro, M. Shiomi, H. Sumioka*, "Baby schema in human-robot physical interaction: influence of baby likeness in a communication robot on caregiving behavior", *Computers in Human Behavior: Artificial Humans*, 4, 2025, p.100150.

[4] *W. Budiharto, A. D. Cahyani, P. C. Rumondor, D. Suhartono*, "EduRobot: intelligent humanoid robot with natural interaction for education and entertainment", Procedia Computer Science, 116, 2017, pp.564-570.

[5] *Z. Sun, H. Yang, Y. Ma, X. Wang, Y. Mo, H. Li, Z. Jiang*, "BIT-DMR: A humanoid dual-arm mobile robot for complex rescue operations", IEEE Robotics and Automation Letters, 7(2), 2021, pp.802-809.

[6] *A. Bogdanov, E. Dudorov, A. Permyakov, A. Pronin, I. Kutlubaev*, "Control system of a manipulator of the anthropomorphic robot FEDOR", 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), Kazn, Russia, 2019, pp.449-453.

[7] *S. Sulaiman, A. P. Sudheer, S. Mohan, E. Magid*, "Manipulability analysis of a tree type humanoid upper-body robot with dual redundant arms", Scientia Iranica, 2024.

[8] *M. Asada, K. F. MacDorman, H. Ishiguro, Y. Kuniyoshi*, "Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots", Robotics and Autonomous systems, 37(2-3), 2001, pp.185-193.

[9] *M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar*, Robot modeling and control, Wiley, 2020, 608p.

[10] *M. Cardona, F. E. Serrano*, “Lagrange-Euler approach”, In Rehabilitation Robotics, 2025, pp.77-89.

[11] *S. Sulaiman, A. Pillai, A. Eryomin, T. Tsoy, E. Magid*, “Kinematic modelling, workspace analysis and static structural analysis of a 3 DoF manipulator for an elevator automation”, 2024 4th International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR), IEEE, 2024, pp.300-304.

[12] *M. M. Alam, S. Ibaraki, K. Fukuda*, “Kinematic modeling of six-axis industrial robot and its parameter identification: a tutorial”, International Journal of Automation Technology, 15(5), 2021, pp.599-610.

[13] *M. Svinin, E. Magid, I. Goncharenko, V. Kryssanov*, “Motion planning strategies and human performance in the manipulation of underactuated flexible objects”, Proceedings 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2018), 2019, pp.3458-3465.

[14] *S. A. Chander, A. Mukherje, V. D. Shivling, A. Singla*, “Enhanced Euler–Lagrange formulation for analyzing human gait with moving base reference”, Journal of Mechanisms and Robotics, 17(1), 2025, p.011006.

[15] *A. Green, J. Sasiadek*, “Robot manipulator control for rigid and assumed mode flexible dynamics models”, In AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit, 2003, p.5435.

[16] *S. Sulaiman, A. P. Sudheer, E. Magid*, “Torque control of a wheeled humanoid robot with dual redundant arms”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 238(2), 2024, pp.252-271.

Coverage of an agricultural area by unmanned aerial vehicles considering external and internal constraints

R. Faizullin[1], M. Mustafin[1], M. Svinin[2], E. Magid[1]
[1]Kazan Federal University, Kazan, Russia,
[2]Ritsumeikan University, Osaka, Japan,
fzllnrml@gmail.com, mustafin@it.kfu.ru,
magid@it.kfu.ru, svinin@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract. *This paper addresses a problem of covering agricultural areas using a group of unmanned aerial vehicles (UAVs), taking into account battery limitations and wind load effects. To increase the model realism, random factors such as a wind direction, a wind speed, and variability of UAVs' battery are introduced. A primary goal is to minimize total mission time by efficient placing of charging stations. The problem is solved using the Particle Swarm Optimization method, where each particle encodes coordinates of the stations, and a fitness function is estimated using the Monte Carlo method based on a variety of simulations. The model includes UAV recharging at static charging stations.*

I. Introduction

Precision agriculture [1] extensively uses UAVs to enhance agricultural productivity, for example, in applications of fertilizers or plant protection products. Advantages of using UAVs include precise spraying, high-speed operations, and reduced human involvement [2]. However, these tasks require solving complex computational problems involving UAV path planning.

This paper considers the problem of covering an agricultural area using a fixed number of identical UAVs designated for spraying [3]. Each UAV has a limited battery charge and requires periodic recharging. To support this, charging stations [4] are installed in the area, which UAVs must return to when their battery charge drops below a critical threshold. The main task is to determine the optimal coordinates for placing charging stations to minimize downtime and improve overall coverage efficiency.

A wind is considered as a force with a random direction and magnitude, not exceeding a UAV's maximum thrust. Wind impacts [5] both energy consumption and mission time, requiring its inclusion into the proposed model. A discharge rate parameter is introduced to represent variability in UAV battery performance. To estimate UAV flight time and the fitness function of each solution, a Monte Carlo method [6] is used, running a number of virtual experiments. Each experiment randomly generates parameters such as wind direction and strength, as well as battery discharge rate variation.

The resulting approach allows for fitness function evaluation across various charging station configurations and UAV flight strategies. This brings the proposed model closer to real conditions and supports a development of robust route planning algorithms. The results may be applied in precision agriculture systems to automate fertilizer application with minimal energy and time consumption.

II. Problem statement

An agricultural area to be covered with fertilizers is defined as a two-dimensional region $M \subset R^2$, given by a polygon formed by its vertices' coordinates. A fixed number (N) of identical UAVs $U = \{U_1, \dots U_N\}$ is used. Each UAV starts with a fully charged battery of capacity E_{cap} and consumes energy E while moving. Without a wind, if a UAV flies at a constant speed, its base energy consumption is modeled using discharge rate constant λ:

$$\Delta E = \lambda \cdot d, \tag{1}$$

where d is a distance traveled. With the wind, energy consumption (1) increases if the wind blows in an opposite direction. The wind is modeled at each simulation step as a vector with a magnitude w (speed) and a direction θ (angle relative to a UAV's direction of motion). Therefore, a headwind energy cost can be calculated as:

$$\Delta E = \lambda \cdot d \cdot (1 + \alpha \cdot w \cdot cos\theta), \tag{2}$$

where α reflects an effect of wind resistance on energy use. If the wind aligns with the direction of motion ($cos\theta = -1$), energy consumption (2) decreases. If it opposes the direction ($cos\theta = 1$), energy use increases.

When UAV's charge E drops below critical threshold γ, the UAV ends the mission and heads to a charging station via a shortest path. After recharging, the UAV returns to a point where it left off and resumes the mission. Since each return adds to total mission time, the charging stations should be placed to minimize an average travel distance to them. Overall mission completion time T is defined as:

$$T = \max_{1 \le i \le N} T_i \,, \tag{3}$$

where T_i is the mission time for drone i.

The Monte Carlo method is used to incorporate randomness in a wind strength and direction and variability in UAVs' battery parameters. For each configuration of a station placement and a UAV's route, S simulations were run. Each simulation includes a random generation of the wind speed and direction and random battery discharge parameter δ. A UAV flight is simulated and mission times are computed. After K simulations, the average cost is calculated as:

$$F = \frac{1}{S}\sum_{j=1}^{S} T^{(j)} \,, \tag{4}$$

where $T^{(j)}$ is the mission completion time (3) for j-th simulation.

The station placement is optimized using a particle swarm optimization (PSO) algorithm [7]. Each particle encodes coordinates of all k charging stations. The particles are initialized randomly within the territory. They move through a solution space according to an update rule:

$$\overrightarrow{v_t} = \omega\overrightarrow{v_{t-1}} + c_1 r_1 (UAV_{best} - \overrightarrow{x_t}) + c_2 r_2 (G_{best} - \overrightarrow{x_t}), \qquad \overrightarrow{x_t} = \overrightarrow{x_{t-1}} + \overrightarrow{v_t} \tag{5}$$

Particle movement is determined by their current velocity $\overrightarrow{v_t}$ and best-known positions: their own best position UAV_{best} and global best position G_{best} found by the swarm. Parameters ω, c_1, c_2 control a balance between inertia, individual experience, and collective experience; r_1, r_2 are random scalars. Each particle's fitness the quality of its solution was evaluated by function F (4), computed using Monte Carlo simulations. Optimization continues until either a maximum number of iterations is reached or function F (4) stabilizes.

III. Simulation results

The UAV fleet's operation was simulated using Python programming language to assess the impact of various factors on coverage mission completion time [8]. These included the location of charging stations, the wind conditions, and the battery capacity variability. Monte Carlo simulation was employed to evaluate quality of solutions, considering stochastic elements. *Matplotlib* was used for visualization of experiments, while PSO was implemented (5) with the use of basic Python structures and *NumPy*. Special attention was given to ensure stability of results across multiple runs and sensitivity to an initial station placement.

IV. Conclusions

The proposed approach considers the wind and the battery instability in adapting UAVs' routes to real-world conditions. Optimizing the placement of charging stations with PSO demonstrated a positive effect. The proposed methodology is applicable in precision agriculture systems, where high efficiency should be achieved with a minimal energy and time consumption.

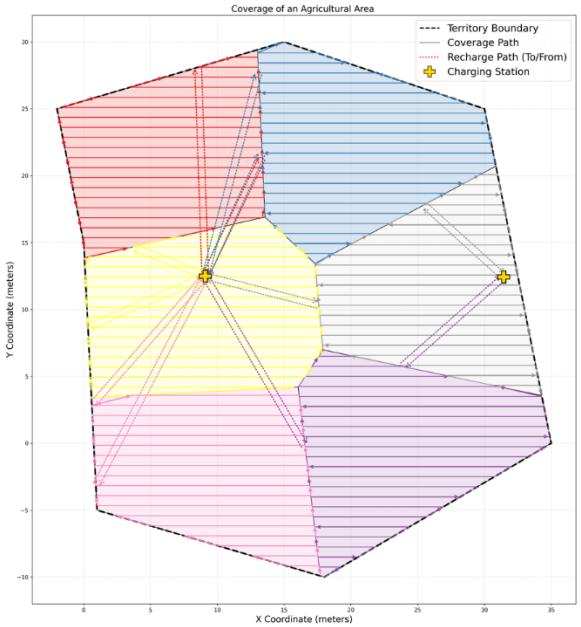


Fig.1. The visualization of an agricultural territory coverage by 3 UAVs,
considering wind load and battery limitations

References

[1] *U. Shafi, R. Mumtaz, J. García-Nieto, S. A. Hassan, S. A. R. Zaidi, N. Iqbal*, "Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications", *Sensors* 19(17), 2019, p. 3796.

[2] *A. T. Meshram, A. V. Vanalkar, K. B. Kalambe, A. M. Badar*, "Pesticide spraying robot for precision agriculture: a categorical literature review and future trends", *Journal of Field Robot* 39(2), 2021, pp. 153–171.

[3] *H. Chen, Y. Lan, B. K. Fritz, W. C. Hoffmann, S. Liu*, "Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV)", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 14(1), 2021, pp. 38–49.

[4] *H. Ucgun, U. Yuzgec, C. Bayilmis*, "A review on applications of rotary-wing unmanned aerial vehicle charging stations", *International Journal of Advanced Robotic Systems* 18(3), 2021.

[5] *B. H. Wang, D. B. Wang, Z. A. Ali, B. T. Ting, H. Wang*, "An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle", *Measurement and Control* 52(7–8), 2019, pp. 731–739.

[6] *R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese*. Simulation and the monte carlo method. John Wiley & Sons, 2016, 428p.

[7] *A. G. Gad*, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review", Archives of Computational Methods in Engineering 29, 2022, pp. 2531–2561.

[8] *R. Faizullin, T. Tsoy, E. A. Martínez-García, E. Magid*, "Potential of genetic algorithms in multi-UAV coverage problem", *The 2024 International Conference on Artificial Life and Robotics* (ICAROB2024) 29, 2024, pp. 170–173.

Применение импульсного вихретокового метода для определения электрической проводимости скрытых металлических объектов

Р. О. Белокопытов, В. П. Лунин, М. Е. Дёминова
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия,
BelokopytovRO@mpei.ru, LuninVP@mpei.ru, DiominovaM@mpei.ru

Аннотация. *В статье описано создание трёхмерной модели на основе метода конечных элементов, предназначенной для исследования импульсно-вихретокового метода обнаружения металлических объектов, скрытых внутри диэлектрических сред, таких как бетон. Основное внимание уделяется анализу отклика системы на наличие металлических включений с разной электропроводностью. В процессе численного моделирования изучается, как глубина залегания объектов и параметры возбуждающего импульса, в частности его скважность, влияют на форму измеряемого сигнала. Результаты показывают, что временной параметр — момент пересечения нуля напряжения на приёмной катушке — обладает большей устойчивостью к изменению зазора между преобразователем и объектом, чем амплитудный показатель. Это делает его более надёжным информативным признаком для оценки проводимости. Также установлено, что снижение скважности импульса повышает чувствительность метода к различиям в электропроводности исследуемых изделий.*

I. Введение

Обнаружение скрытых объектов представляет собой важную задачу в таких областях, как безопасность, археология, медицина и военное дело. Определение типа материала обнаруженного изделия имеет принципиальное значение: это позволяет не только повысить точность идентификации, но и предварительно оценить его потенциальную опасность, назначение или ценность. Одним из эффективных способов решения такой задачи является индукционный метод, лежащий в основе работы современных металлоискателей. Он основан на явлении электромагнитной индукции: возбуждающая катушка формирует переменное электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в проводящих объектах. Эти токи, в свою очередь, порождают вторичное поле, воспринимаемое измерительной катушкой и анализируемое для обнаружения металлических предметов. Однако, несмотря на высокую чувствительность, такие устройства зачастую не позволяют достоверно определить материал объекта.

Существенным шагом в развитии таких устройств стало использование импульсного возбуждения, обеспечивающего лучшую устойчивость к внешним помехам и более глубокое проникновение вихревых токов за счёт широкого спектра частот в возбуждающем сигнале [1, 2]. Цель статьи — исследовать возможность применения импульсного вихретокового метода для оценки электрической проводимости и, как следствие, определения типа материала скрытого металлического объекта.

II. Построение конечно-элементной модели

Для проведения опытов по определению проводимости металлических объектов была построена математическая модель накладного вихретокового преобразователя с импульсным возбуждением, в состав которого входят: возбуждающая и измерительные катушки, ферритовый магнитопровод, а также экранирующая оболочка из алюминия (рис. 1) [3].

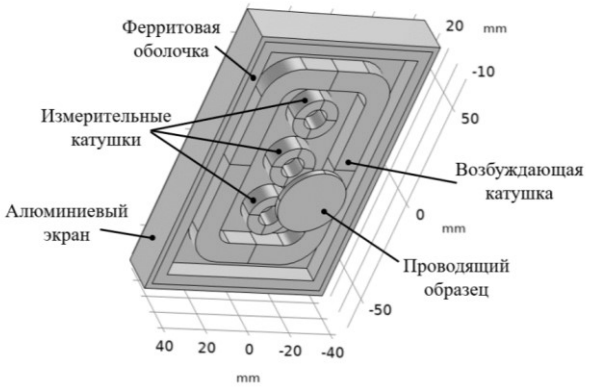
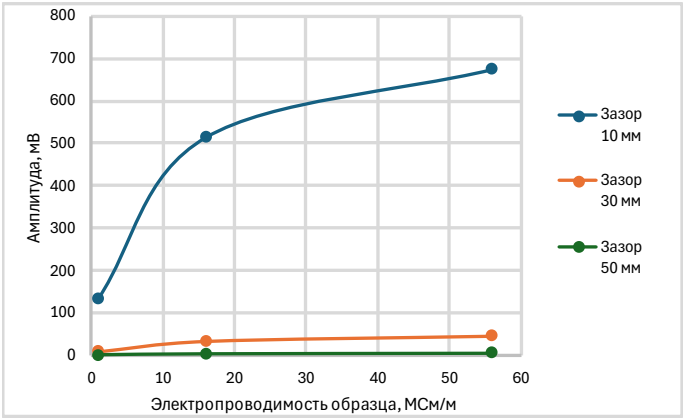


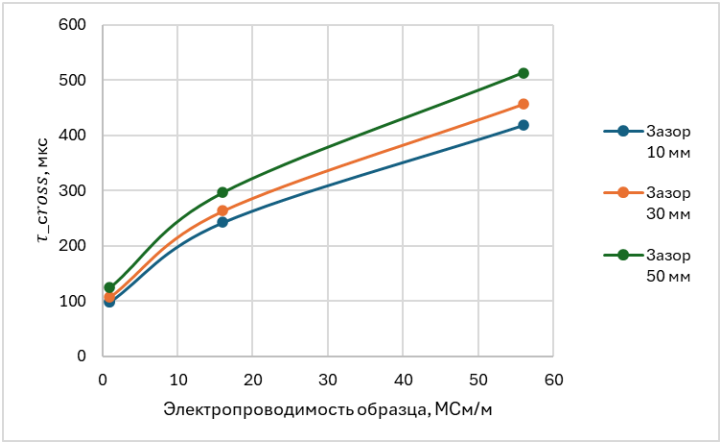
Рис. 1. Трёхмерная модель вихретокового преобразователя с образцом

III. Анализ результатов

В результате расчёта модели были получены зависимости амплитудных значений и значений времени пересечения нуля напряжения «разностных» сигналов на измерительных катушках от электрической проводимости металлического образца для зазоров величиной 10, 30 и 50 мм.(рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Зависимости: а) – амплитуды от электропроводимости, б) – времени пересечения нуля напряжения от электропроводимости

Графики показывают, что момент времени пересечения нуля обладает большей устойчивостью к изменению зазора между преобразователем и объектом, чем амплитуда напряжения, что делает время пересечения более надёжным информативным признаком для оценки значения проводимости.

Также было обнаружено, что уменьшение скважности возбуждающего сигнала ведет к росту времени пересечения нуля напряжения на измерительной катушке и увеличению чувствительности преобразователя к проводимости исследуемого объекта (рис. 3).

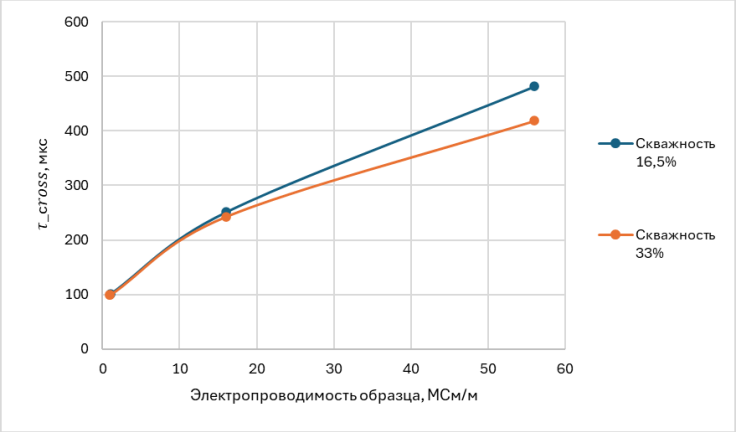


Рис. 3. Зависимость амплитуды от электропроводимости при различной скважности

IV. Заключение

В ходе работы была построена конечно-элементная модель импульсно-вихретокового преобразователя, предназначенная для проведения опытов по определению электрической проводимости скрытых металлических объектов. Результаты исследования показывают, что момент времени пересечения нулевого уровня напряжения на измерительной катушке является надежным информативным признаком проводимости материала. Также данный параметр продемонстрировал хорошую устойчивость к вариациям зазора между преобразователем и образцом.

Литература

[1] *Yang F., Li Z., Fu Y., Huang W., Tang C., Cao A.* Comparison of different types of focusing probes in pulsed eddy current testing // *AIP Advances*. — 2022. — Vol. 12. — P. 075010. — DOI: 10.1063/5.0090311.

[2] Eddy curent metal detectors - pulse vs. CW // ResearchGate URL: *https://www.researchgate.net/publication/267987715* (дата обращения: 19.04.2025).

[3] Simulation of an ECT Sensor to Inspect the Reinforcement of Concrete Structures // ResearchGate URL: *https://www.researchgate.net/publication/289534447_Simulation_of_an_ECT_Sensor_to_Inspect_the_Reinforcement_of_Concrete_Structures* (дата обращения: 19.04.2025).

Секция 6

Математические методы и модели

Mathematical methods and models

Анализ ресурсной СМО MMPP+2MMPP)$^{(v)}$/)/M/∞в условии предельно редких изменений состояний случайной среды

С. П. Моисеева[1], Е. В. Панкратова[2]
[1]Томский государственный университет, г. Томск, Россия,
[2]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
smoiseeva@mail.ru, pankate@gmail.com

***Аннотация**. Предлагается решение задачи исследования гетерогенной системы массового обслуживания с тремя потоками запросов случайного объема на два типа ресурсов, при этом один из потоков формирует запросы на оба ресурса. Предполагается, что интенсивность входящих потоков зависит от состояния марковской случайной среды, а время, на которое поступающее требование занимает ресурс, является положительной случайной величиной с произвольной функцией распределения. Запросы на ресурс также положительные случайные величины с заданными функциями распределения вероятностей. Решение поставленной задачи проводится методом асимптотического анализа при условии предельно редких изменений состояний случайной среды. Получена двумерная характеристическая функция для распределения вероятностей суммарных объемов занимаемых ресурсов.*

I. Введение

Развитие сетей мобильной связи направлено на решение двух основных задач: расширение возможностей существующих систем для высокоскоростной передачи данных (mobile broadband, MBB) и создание комплексной инфраструктуры для межмашинных коммуникаций (machine-type communications, MTC), предназначенной как для потребительских, так и для промышленных целей. Эта инфраструктура послужит основой для полноценного внедрения Интернета вещей [1]. В рамках одной сети необходимо обеспечить эффективную передачу двух типов трафика, обладающих принципиально разными характеристиками и требованиями к качеству обслуживания. Как правило, телефонные и мультимедийные услуги, характеризуются длительными соединениями и передачей больших объемов данных, а трафик MTC предполагает передачу небольших пакетов данных от очень большого числа устройств.

Для исследования реальных систем передачи данных, сетей сотовой связи, систем облачных вычислений, как правило, применяется математический аппарат теории массового обслуживания, и включает описание входящего потока заявок и процесс работы обслуживающих устройств, а также особенности функционирования, например, тот факт, что параметры могут меняться как с течением времени [7], так и под влиянием внешних факторов. Такие системы в теории массового обслуживания называют системами массового обслуживания, функционирующими в случайной среде. Эти модели более точно отражают реальные процессы по сравнению с классическими системами, учитывая изменение внешней случайной среды во времени и реакцию системы на эти изменения. Особенностью рассматриваемой в настоящей статье модели является также учет того, что запросы на обслуживание могут быть случайного размера (объема), что в литературе называют ресурсными системами массового обслуживания [5].

В настоящей статье проводится анализ ресурсной систем массового обслуживания со случайными требованиями к объему занимаемых ресурсов двух типов, на вход которой поступают два потока запросов случайного объема на различные типы ресурсов и один поток, который формирует запросы на оба ресурса. Интенсивность входящих потоков зависит от состояния марковской случайной среды. Таким образом все потоки являются марковски модулированными входящими потоками (Markov Modulated Poisson Process, MMPP), управляемые общей цепью Маркова [2,3].

II. Математическая модель

Рассмотрим РСМО с неограниченным числом обслуживающих приборов, на вход которой поступает три потока требований на ресурсы: один с требованиями на оба ресурса и два с

требованиями на каждый тип ресурса. Интенсивность потоков меняется в зависимости от состояния случайной среды. Будем считать, что случайная среда является цепью Маркова $k(t)$ с конечным числом состояний и заданной матрицей инфинитезимальных характеристик **Q**. Таким образом на вход системы поступают три марковски модулированных пуассоновских потока (MMPP-поток), управляемых общей цепью Маркова, заданных матрицами условных интенсивностей $\mathbf{\Lambda} = \mathrm{diag}\,\lambda_k$ для потока запросов на оба ресурса и $\mathbf{\Lambda}^1 = \mathrm{diag}\,\lambda^1{}_k$ $\mathbf{\Lambda}^2 = \mathrm{diag}\,\lambda^2{}_k$ для запросов на отдельный тип. Каждая заявка формирует запрос на случайное количество каждого типов ресурса случайного объема $v_i \geq 0$: первого типа – с функцией распределения вероятностей $G_1(y) = P\{v_1 < y\}$, второго типа – с функцией распределения $G_n(y) = P\{v_n < y\}$. Запросы на ресурсы обрабатываются в течение случайного времени с функцией распределения вероятностей $B_i(x)$, соответствующей типу ресурса.

Ставится задача исследования случайного двумерного процесса $\mathbf{V}(t) = [V_1(t), V_2(t)]$ – суммарных объемов ресурсов, занимаемых поступившими требованиями. Данный процесс не является марковским, поэтому для его исследования применятся метод многомерного динамического просеивания.

Изобразим две параллельных оси времени (Рисунок 1). Ось под номером 0 будет отображать события входящего потока, ось под номером 1 будет соответствовать просеянному потоку. Зафиксируем произвольный момент времени в будущем $T > t_0$.

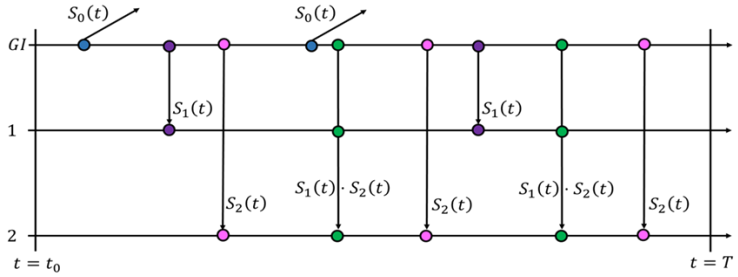


Рис.1. Схема просеивания

Зададим функцию $S(t) \in [0,1]$, определяющую динамическую вероятность просеивания. Полагаем, что заявка входящего потока, поступившая в *i*-ый блок системы в момент времени $t < T$, с вероятностью $S_i(t) = 1 - B_i(T-t)$ сформирует событие просеянного потока, а с вероятностью $1 - S_i(t)$ заявка закончит обслуживание и освободит занимаемый ресурс, значит в просеянном потоке данная заявка не рассматривается.

Известно [6], что распределение вероятностей двумерного процесса объема занятых ресурсов $\mathbf{V}(t) = [V_1(t), V_2(t)]$ совпадает с многомерным распределением вероятностей числа просеянных заявок $\mathbf{W}(t) = [W_1(t), W_2(t)]$.

Обозначим распределения вероятностей трехмерного марковского процесса:

$$P(k, w_1, w_2, t) = P\{k(t) = k, W_1(t) < w_1, W_2(t) < w_2\}$$

И запишем систему интегрально-дифференциальных уравнений Колмогорова

$$\frac{\partial P(k, w_1, w_2, t)}{\partial t} = -\left(\lambda_k + \lambda_k{}^{(1)} + \lambda_k{}^{(2)}\right) P(k, w_1, w_2, t) +$$

$$+\lambda_k S_1(t)\left(1 - S_2(t)\right) \int_0^{w_1} P(k, w_1 - y_1, w_2, t)\, dG_1(y) + \lambda_k S_2(t)\left(1 - S_1(t)\right) \int_0^{w_2} P(k, w_1, w_2 - y, t)\, dG_2(y) +$$

$$+\lambda_k{}^{(1)} S_1(t) \int_0^{w_1} P(k, w_1 - y_1, w_2, t)\, dG_1(y) + \lambda_k{}^{(2)} S_2(t) \int_0^{w_2} P(k, w_1, w_2 - y, t)\, dG_2(y) +$$

$$+\lambda_k\left(1-S_1(t)\right)\left(1-S_2(t)\right)P(k,w_0,w_1,w_2,t)+\left[\lambda_k^{(1)}\left(1-S_1(t)\right)+\lambda_k^{(2)}\left(1-S_2(t)\right)\right]P(k,w_0,w_1,w_2,t)$$

$$+\lambda_k S_1(t)S_1(t)\int_0^{w_1}\int_0^{w_2}P(k,w_1-y_1,w_2-y_2,t)\,dG_1(y_1)\,dG_2(y_2)+\sum_{v}q_{vk}P(v,w_1,w_2,t)$$

Начальное условие для решения $P(k,w_1,w_2,t)$ в момент времени t_0 определим в виде

$$P(k,w_1,w_2,t_0)=\begin{cases}r(k),\ w_1=w_2=0,\\ 0,\ \textit{иначе.}\end{cases}$$

где $r(k)$ – стационарное распределение вероятностей состояний цепи Маркова $k(t)$.

Введем частичные характеристические функции вида $h(k,v_1,v_2,t)=\int_0^{\infty}e^{jv_1w_1}\int_0^{\infty}e^{jv_2w_2}P(k,dw_1,dw_2,t)$, где $j=\sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Тогда можем записать систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для характеристических функций для $k=1\ldots K$,

$$\frac{\partial h(k,v_1,v_2,t)}{\partial t}=h(k,v_1,v_2,t)\Big[\left(\lambda_k+\lambda_k^{(1)}\right)S_1(t)\left(G_1^*(v_1)-1\right)+$$

$$+\left(\lambda_k+\lambda_k^{(2)}\right)S_2(t)\left(G_2^*(v_2)-1\right)+\lambda_k S_1(t)S_1(t)\left(1-G_1^*(v_1)\right)\left(1-G_2^*(v_2)\right)\Big]+\sum_{v=k}q_{vk}h(v,v_1,v_2,t)$$

где $G_i^*(v_i)=\int_0^{\infty}e^{jv_iy}dG_i(y)$.

III. Асимптотический анализ при условии предельно редких изменений случайной среды

Проведем исследование методом асимптотического анализа. Условие редких изменений состояний управляющей цепи Маркова определяется достаточно малыми значениями инфинитезимальных характеристик. Используя этот факт, доказано, что асимптотическая характеристическая функция суммарных ресурсов имеет вид:

$$h(v_1,v_2)=\sum_{k=1}^{K}r(k)\exp\Big\{\left(\lambda_k+\lambda_k^{(1)}\right)\left(G_1^*(v_1)-1\right)b_1+\left(\lambda_k+\lambda_k^{(2)}\right)\left(G_2^*(v_2)-1\right)b_2$$

$$+\lambda_k\left(1-G_1^*(v_1)\right)\left(1-G_2^*(v_2)\right)b_{12}\Big\}.$$

Откуда получаем выражения для одномерных стационарных характеристических функций каждого типа ресурса

$$h(v_1)=\sum_{k=1}^{K}r(k)\exp\Big\{\left(\lambda_k+\lambda_k^{(1)}\right)\left(G_1^*(v_1)-1\right)b_1\Big\},$$

$$h(v_2)=\sum_{k=1}^{K}r(k)\exp\Big\{\left(\lambda_k+\lambda_k^{(2)}\right)\left(G_2^*(v_2)-1\right)b_2\Big\}.$$

Очевидно, маргинальные распределения вероятностей числа занятых приборов каждого типа являются взвешенной суммой пуассоновских распределений.

IV. Заключение

На практике ресурсы, предоставляемые для использования, обычно ограничены, поэтому предположение о неограниченном количестве каналов является достаточно условным, поскольку в таком случае в системе не возникает потерь. Однако полученные результаты, такие как асимптотическое распределение вероятностей, помогут рассчитать оптимальное количество ресурсов каждого типа, необходимое для системы с ограниченными ресурсами и обеспечивающее заданную вероятность потерь.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-21-00454 https://rscf.ru/project/24-21-00454

Литература

[1] *V. M. Vishnevskiy, K. E. Samouylov, N. V. Yarkina,* “Mathematical model of LTE cells with machine-type and broadband communications”, *Autom. Remote Control*, **81**:4 (2020), 622–636

[2] *D.M. Lucantoni* “New Results on the Single Server Queue with a Batch Markovian Arrival Process” *Comm. Statist. Stoch. Models*. 1991. V. 7. No. 1. P. 1–46.

[3] *S.R. Chakravarthy* “Markovian arrival processes”. Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science. John Wiley & Sons, Inc., 2010.

[4] В.М. Вишневский, А.Н. Дудин, В.И. Клименок *Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях*. М.: Техносфера, 2018.

[5] *А. В. Горбунова, В. А. Наумов, Ю. В. Гайдамака, К. Е. Самуйлов,* “Ресурсные системы массового обслуживания с произвольным обслуживанием”, Информ. и её примен., 13:1 (2019), 99–107

[6] *S. P. Moiseeva, T. V. Bushkova, E. V. Pankratova, M. P. Farkhadov, A. A. Imomov* “Asymptotic Analysis of Resource Heterogeneous QS (MMPP+2M(2,ν)/GI(2)/∞ under Equivalently Increasing Service Time”. Automation and Remote Control, 83(8), 2022, pp.1213–1227

[7] *Я. А. Сатин, А. Л. Крюкова, В. С. Ошушкова, А. И. Зейфман,* “О монотонности некоторых классов марковских цепей”, Информ. и её примен., **16**:2 (2022), 27–34

AI and ML-based modeling of stochastic longitudinal vibrations in a viscoelastic rope with dynamic boundaries

V. L. Litvinov[1], K. V. Litvinova[2], A. V. Tarakanov[1], A. A. Uyutov[1]
[1]Samara State Technical University, Samara, Russia,
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,
vladlitvinov@rambler.ru, kristinalitvinova900@rambler.ru,
tarakanov2102@mail.ru, a.a.uyutov@yandex.ru

Abstract. *The problem of stochastic longitudinal oscillations of a viscoelastic rope with moving boundaries is considered. The main attention is paid to the application of artificial intelligence (AI), neural networks and machine learning (ML) methods for analyzing resonance phenomena, predicting optimal system parameters and preventing resonance. A method for constructing solutions of integro-differential equations is proposed, which is extended to a wider class of problems with moving boundaries. The problem of stochastic longitudinal oscillations of a viscoelastic rope with moving boundaries is formulated taking into account the influence of damping forces in the form of a system of stochastic integro-differential equations, which is reduced to the study of a system of stochastic differential equations with random initial conditions. The use of deep neural networks (DNN), Monte Carlo methods and adaptive control significantly improves the accuracy of forecasts and the efficiency of system control. The neural network is trained on data on the behavior of the system at various frequencies and parameters. In this case, the network predicts resonant frequencies and suggests optimal parameters. The results of the AI work are tested on a mathematical model. Calculations confirmed that the parameters proposed by artificial intelligence do indeed prevent resonance.*

Systems with moving boundaries are widely used in engineering (lifting device cables [1–5,7,8], flexible transmission lines [6], etc.). The presence of moving boundaries creates significant problems in the mathematical description of such systems. Exact solution methods are limited to the wave equation and relatively simple boundary conditions [9]. Among the approximate methods, the most effective is the approach based on constructing solutions of integro-differential equations [7,11,21–24], as well as the Kantorovich-Galerkin method [8–10,14]. This method has been extended to a wider class of model boundary value problems that take into account bending rigidity, resistance of the external environment, and the rigidity of the base of an oscillating object. The solution is implemented in dimensionless variables using the TB-Analysis software package, developed in the Matlab and Python environments (using the following libraries: TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn). This allows applying the obtained results to calculations on a wide range of technical objects. The TB-Analysis package includes a module for managing resonance phenomena. The "Managing Resonance Phenomena" function is designed to identify resonance areas and establish prevention conditions imposed on the model parameters using artificial intelligence. In addition, it is recognized that deterministic modeling of the system is not always adequate, which requires a transition to probabilistic-statistical methods that take into account random variables and stochastic oscillations.

The study of viscoelastic properties includes the analysis of the stochastic stability of systems and their reliability. Using artificial intelligence, the resonant frequencies of the system were determined along with the resonance prevention conditions. Optimization of the system parameters was performed to minimize the resonance probability. Data collection included the amplitude-frequency characteristics of the system. Key parameters affecting resonance were identified. A neural network was trained on this data to predict resonant frequencies and propose optimal parameters. Nonlinear regression methods were used to determine resonance conditions. When the data was insufficient, the Monte Carlo method was applied. Machine learning methods were used to analyze which system parameters have the most significant impact on resonance. Frequency analysis was performed using the fast Fourier transform (FFT) method to identify resonance areas. Clustering algorithms (k-means) were used to group frequencies where the system is most vulnerable. For visualization, amplitude-frequency characteristic

graphs were constructed to clearly identify resonance zones. To prevent resonance, parameter optimization was performed using gradient descent methods, including damping adjustment and stiffness change. Adaptive control methods and neural network technologies were used to tune the system in real time. The AI results were tested on a mathematical model. Calculations confirmed that the proposed parameters effectively prevent resonance. This paper presents an approach based on artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) methods, which not only improves the accuracy of calculations, but also significantly reduces the time required to determine the optimal system parameters.

References

[1] Kolosov L.B., Zhigula T.I. Longitudinal–transverse vibrations of the rope of the lifting installation // Izv. Universities. Mining Journal. 1981. No. 3. P. 83–86.

[2] Zhu W.D., Chen Y. Theoretical and experimental investigation of elevator cable dynamics and control // J. Vibr. Acoust. 2006. No. 1. P. 66–78.

[3] Shi Y., Wu L., Wang Y. Nonlinear analysis of natural frequencies of a tether system // J. Vibr. Eng. 2006. No. 2. P.173–178.

[4] Wang L., Zhao Y. Multiple internal resonances and non–planar dynamics of shallow suspended cables to the harmonic excitations // J. Sound Vib. 2009. No. 1–2. P. 1–14.

[5] Zhao Y., Wang L. On the symmetric modal interaction of the suspended cable: three–to one internal resonance // J. Sound Vib. 2006. No. 4–5. P.1073–1093.

[6] Vesnitsky A.I. Waves in systems with moving boundaries and loads. Moscow: Fizmatlit, 2001. 320 p.

[7] Goroshko O.A., Savin G.N. Introduction to the mechanics of deformable one–dimensional bodies of variable length. Kiev: Nauk. dumka, 1971. 290 p.

[8] Litvinov V.L., Anisimov V.N. Transverse vibrations of a rope moving in a longitudinal direction // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. T. 19.No. 4. – P.161–165.

[9] Litvinov V.L., Anisimov V.N. Mathematical modeling and research of oscillations of one–dimensional mechanical systems with moving boundaries: monograph / V. L. Litvinov, V. N. Anisimov – Samara: Samar. state tech. un–t, 2017 .– 149 p.

[10] Lezhneva A.A. Free bending vibrations of a beam of variable length // Uchenye zapiski. Perm: Perm. un–t, 1966. No. 156. P. 143–150.

[11] Savin G.N., Goroshko O.A. Variable length thread dynamics. Kiev: Nauk. Dumka, 1962. 332 p.

[12] Litvinov V.L. Investigation of free vibrations of mechanical objects with moving boundaries using the asymptotic method // Zh. Middle Volga Mathematical Society. 2014. T. 16.No. 1. P.83–88.

[13] Liu Z., Chen G. Analysis of Plane Nonlinear Free Vibrations of a Carrying Rope Taking into Account the Influence of Flexural Rigidity // J. Vibr. Eng. 2007. No. 1. P. 57–60.

[14] Litvinov V.L., Anisimov V.N. Application of the Kantorovich – Galerkin method for solving boundary value problems with conditions on moving boundaries // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Rigid Body Mechanics. 2018. No. 2. P. 70–77.

[15] Litvinov V.L., Anisimov V.N. Transverse vibrations of a rope moving in a longitudinal direction // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. T. 19. No. 4. – P.161–165.

[16] Litvinov V.L., Anisimov V.N. Mathematical modeling and research of oscillations of one –dimensional mechanical systems with moving boundaries: monograph / V. L. Litvinov, V. N. Anisimov – Samara: Samar. state tech. un–t, 2017 .– 149 p.

[17] Elepov B. S., Kronberg A. A., Mikhailov G. A. and Sabelfeld K. K. Solution of boundary value problems by the Monte Carlo method. – Novosibirsk: Nauka, 1980. – 174 p.

[18] Ermakov S. M. Monte Carlo Method in Computational Mathematics: An Introductory Course. – St. Petersburg: Nevsky Dialect; M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2009. – 192 pp.

[19] Fishman G. S. Monte Carlo. Concepts, Algorithms, and Applications. — SpringerVerlag, 1995 (Corrected 3 rd printing, 1999). — 718 pp.

[20] Litvinov V.L. Stochastic longitudinal oscillations of a viscoelastic rope with moving boundaries taking into account the action of damping forces // Probability Theory and Its Applications, RAS, 2022, Vol. 67, No. 4, pp. 835–836.

[21] Litvinov V.L. Solution of boundary value problems with moving boundaries using an approximate method for constructing solutions of integro–differential equations // Tr. Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2020.Vol. 26, №. 2. P. 188–199.

[22] Litvinov V.L., Litvinova K.V. An approximate method for solving boundary value problems with moving boundaries by reduction to integro–differential equations// Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 945–954.

[23] Litvinov V.L. Certificate of state registration of a computer program. Automated software package for studying oscillations and resonance phenomena in mechanical systems with moving boundaries "TB-Analysis-7" No. 2025613649, published 13.02.2025.

[24] Litvinov V. L., Litvinova K. V. On One Inverse Method for Solving Problems of Oscillations of Mechanical Systems with Moving Boundaries, Bulletin of Moscow University. Series 1: Mathematics. Mechanics, 2024, No. 3, 53–59.

Reliability study of local navigation system for tethered UAV

N. Ivanova, N. Kalmykov
V.A. Trapeznikov Institute of Control Science of RAS, Moscow, Russia,
nm_ivanova@bk.ru, kalmikov.nik@gmail.com

Abstract*. Tethered unmanned aerial platforms (tUAVs) offer distinct operational advantages compared to autonomous UAVs, particularly their ability to maintain continuous, long-duration missions through ground-based power supply. This capability makes them ideal for various applications where persistent aerial presence is required. However, ensuring operational reliability becomes critical during Global Navigation Satellite System (GNSS) signal degradation, which may occur due to environmental factors or intentional interference. This study presents a novel solution through the development of a laser-based Local Navigation System (LNS), with particular focus on its implementation for tethered high-altitude telecommunication platform. We conduct a comprehensive reliability assessment using established risk tree methodology, which enables quantitative modeling of risk event occurrence times, calculation of key statistical parameters (mean, variance) and estimation of potential damage impacts. The probabilistic-temporal characteristics derived from this analysis provide system operators with critical reliability metrics for operational decision-making and risk mitigation.*

I. Introduction

The development of tethered high-altitude unmanned platforms (tUAVs) represents a promising direction in UAV technology due to their versatile applications in both civilian and defense sectors. These platforms enable operational communications in remote areas and emergency scenarios where conventional systems are unavailable [1,2]. Furthermore, their capability to host electronic warfare systems and surveillance equipment provides critical security solutions for defense installations and civilian infrastructure. Unlike autonomous UAVs, tethered platforms offer extended operational duration through continuous ground-based power supply. The platform's ability to elevate base stations beyond 100 meters facilitates broadband wireless networks with extensive coverage or serves as signal repeaters for enhanced transmission range.

A critical challenge in tUAV development involves ensuring operational reliability during Global Navigation Satellite System (GNSS) signal outages [3], which may occur due to environmental factors (e.g., high-altitude conditions) or artificial interference from electronic warfare systems. Implementing a local navigation system (LNS) for tUAVs operating under compromised GPS/GLONASS conditions not only enhances system reliability but also expands operational capabilities, often constituting a mandatory requirement for military and civilian applications. While numerous studies have investigated LNS implementations [4-6], most focus on conventional UAVs rather than tethered platforms.

This paper introduces an innovative LNS solution utilizing laser scanning technology, providing continuous positioning through real-time processing of LIDAR data from a ground-based control station. The system maintains stable 24/7 operation by tracking the tUAV's position via fixed laser scanners. Our reliability assessment employs a risk tree methodology [7] to evaluate potential failure scenarios, enabling quantitative analysis of system parameters and operational risks. The study includes complete risk tree development, numerical reliability evaluation, and sensitivity analysis of critical performance indicators to input variations.

II. Risk tree for reliability analysis of LNS and its analysis

The risk tree construction incorporates findings from prior research, where [8,9] detail the core tUAV components and [10,11] examine their reliability under various conditions through risk tree analysis. For the current study, the developed risk tree appears in Figure 1, with corresponding input parameters shown in Figure 2.

The numerical analysis assumes elementary event times follow Gamma (Γ) or Gnedenko-Weibull (GW) distributions with fixed means m_T, using coefficients of variation $v = 0.5$ for Γ, $v = 0.52$ for GW, and $v = 1$ for Exponential (Exp) distributions for numerical comparison.

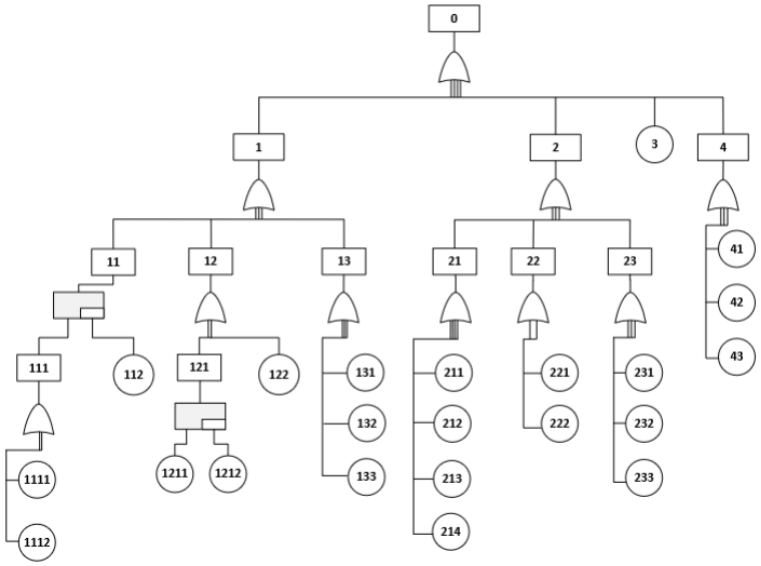


Fig.1. Risk tree for the LNS of tUAV

Event	Description	m_T, hours	m_X, thousand rubles
$A_{[0]}$	Top-level risk event	-	-
$A_{[1]}$	Power supply failure	-	-
$A_{[1,1]}$	Loss of tether power supply	-	-
$A_{[1,1,1]}$	Emergency mode trigger event	-	-
$A_{(1,1,1,1)}$	Severe wind conditions (> 15 m/s)/thunderstorm	1240	0
$A_{(1,1,1,2)}$	Tether cable rupture	$2.2272 \cdot 10^6$	50
$A_{(1,1,2)}$	Backup battery activation	0.13	0
$A_{[1,2]}$	UAV power system failure	-	-
$A_{[1,2,1]}$	Emergency mode trigger event	-	-
$A_{(1,2,1,1)}$	Power conversion system failure	13290	379
$A_{(1,2,1,2)}$	UAV backup battery activation	0.13	0
$A_{(1,2,2)}$	UAV backup battery failure	26280	103
$A_{[1,3]}$	Power generation system failure	-	-
$A_{(1,3,1)}$	Power conversion system failure	13290	379
$A_{(1,3,2)}$	Battery array failure	14640	103
$A_{(1,3,3)}$	Generator unit failure	5000	500

Event	Description	m_T, hours	m_X, thousand rubles
$A_{[2]}$	Position tracking failure	-	-
$A_{[2,1]}$	LIDAR system malfunction	-	-
$A_{(2,1,1)}$	Magnetometer failure	$1.1157 \cdot 10^6$	6
$A_{(2,1,2)}$	Adverse weather conditions (snow/rain/fog)	1550	0
$A_{(2,1,3)}$	Power supply failure	5000	500
$A_{(2,1,4)}$	LIDAR sensor error	1000	206
$A_{[2,2]}$	Computing system failure	-	-
$A_{(2,2,1)}$	Computer battery failure	26280	5
$A_{(2,2,2)}$	Hardware malfunction	43800	30
$A_{[2,3]}$	Communication system failure	-	-
$A_{(2,3,1)}$	Ethernet switch failure	144890	20
$A_{(2,3,2)}$	Fiber optic transceiver failure	445890	50
$A_{(2,3,3)}$	Optical cable failure	$2.2272 \cdot 10^6$	50
$A_{(3)}$	Flight controller failure	$1.1157 \cdot 10^6$	160
$A_{[4]}$	UAV propulsion system failure	-	-
$A_{(4,1)}$	Dual adjacent motor failure (of 8)	$1200 * 2$	$200 * 2$
$A_{(4,2)}$	Triple motor failure (any 3 of 8)	$1200 * 3$	$200 * 3$
$A_{(4,3)}$	Propeller blade damage (1 of 16)	800	2

Fig.2. Description of events and background information

Table 1 presents the estimated mean time-to-occurrence $\hat{m}_T$ for intermediate and top-level events and the estimated damage costs $\hat{m}^{i_k}{}_X$, calculated through the reliability function integrals: $\hat{m}_T = \int_0^\infty R_{i_k}(t)\ dt$, $\hat{m}^{i_k}{}_X = \sum_{1 \le j \le n(i_k)} q_{i_k}(j)\, m^X_{j(i_k)}$. Here $\boldsymbol{i}_k = (i_1, i_2, .., i_k)$, denotes the level-k event vector, $R_{i_k}(t)$ represents the corresponding reliability function, $n(i_k)$ indicates the terminal event index at level k, $m^X_{j(i_k)}$ is the damage estimate (input data), $q_{i_k}(j)$ gives the probability of event $\boldsymbol{i}_k$ occurring due to failure of its j-th component: $q_{i_k}(j) = \int_0^\infty \left[\prod_{i_k=1, i_k \ne j}^{n(i_k)} R_{i_{k-1}, i_k}(u)\right] dF_{i_{k-1}, j}(u)$.

Table 1. Risk assessment measures

	$v = 0.5$ (Γ)		$v = 0.52$ (GW)		$v = 1$ (Exp)	
Events	$\hat{m}_T$	$\hat{m}_X$	$\hat{m}_T$	$\hat{m}_X$	$\hat{m}_T$	$\hat{m}_X$
$A_{[1,1]}$	1240	0	1240.72	0	1239.44	0
$A_{[1,2]}$	9429.57	178	11860.4	210	8826.5	334
$A_{[1,3]}$	4648.83	464	4457.61	450	2910.78	395
$A_{[2,1]}$	859.521	153	828.486	155	541.695	166
$A_{[2,2]}$	23136.4	0	22535	0	16425	0
$A_{[2,3]}$	140540	22	137535	23	104237	29
$A_{[1]}$	1215.77	16	1189.3	32	791.39	124
$A_{[2]}$	859.511	140	827.912	134	521.775	107
$A_{[4]}$	767.665	42	742.829	66	514.286	73
A_{sys}	560.884	73	501.453	85	223.813	138

The results demonstrate how decreasing the coefficient of variation v from 1 to 0.5 increases mean event times by 100-200%, extending the top-level risk event duration from 9 days to approximately 3 weeks while correspondingly reducing potential damage. This quantitative relationship between coefficients of variation and reliability metrics provides critical operational insights for tUAV systems.

III. Conclusion

This research evaluates the reliability of LIDAR-based LNS for tUAV through comprehensive risk assessment. The investigation centers on the primary failure mode of navigation system malfunction during platform operation, modeling event occurrence times using arbitrary distributions of occurrence of elementary events. Our analytical framework quantitatively assesses both failure timing and associated operational impacts, yielding probabilistic reliability metrics that support informed decision-making for system deployment and maintenance. The complete methodology, including detailed risk tree development, numerical simulations, and parameter sensitivity analysis (in understanding the influence of system initial parameters on key reliability indicators), will be presented in the full manuscript version.

References

[1] *M. N. Marques, S. A. Magalhaes, F. N. Dos Santos, H. S. Mendonca*, "Tethered Unmanned Aerial Vehicles – A Systematic Review", *Robotics*, 12(4), 2023, pp. 117-134. DOI: 10.3390/robotics12040117

[2] *V. M. Vishnevsky, A. M. Shirvanyan*, "Calculation of the power required to operate a tethered unmanned airborne platform in gust conditions", *Journal of Physics: Conference Series*, 2091, 2021, pp. 012035. DOI: /10.1088/1742-6596/2091/1/012035

[3] *F. Fattori, S. Cocuzza*, "Tethered Drones: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Applications", Drones, 9(6), 2025, pp. 425-440. DOI: 10.3390/drones9060425

[4] *V. Kangunde, R. S. Jamisola Jr., E. K. Theophilus*, "A review on drones controlled in real-time", International *Journal of Dynamics and Control*, 9, 2021, pp. 1832-1846. DOI: 10.1007/s40435-020-00737-5

[5] *J. Sandino, F. Vanegas, F. Gonzalez, F. Maire,* "Autonomous UAV Navigation for Active Perception of Targets in Uncertain and Cluttered Environments", *2020 IEEE Aerospace Conference*, 2020, pp. 1-10. DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172808

[6] *A. L. Cretu-Sîrcu, H. Schiøler, J. P. Cederholm, I. Sîrcu, A. Schjørring, I. R. Larrad, G. Berardinelli, O. Madsen*, "Evaluation and Comparison of Ultrasonic and UWB Technology for Indoor Localization in an Industrial Environment", *Sensors*, 22(8), 2022, pp. 2927-2945. DOI: 10.3390/s22082927

[7] *V. V. Rykov*, Reliability of Engineering Systems and Technological Risks, London: ISTE WILEY, 2016, 320 p.

[8] *V. M. Vishnevsky, D. Selvamuthu, V. Rykov, D. V. Kozyrev, N. Ivanova, A. Krishnamoorthy*, Reliability Assessment of Tethered High-altitude Unmanned Telecommunication Platforms. k-out-of-n Reliability Models and Applications, Singapore: Springer, 2024, 167 p.

[9] *V. M. Vishnevsky, E. A. Barabanova, K. A. Vytovtov, G. K. Vytovtov*, "Analysis of Tethered Unmanned High-Altitude Platform Reliability", *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications, LNCS*, 14123, 2024, pp. 120-135. DOI: 10.1007/978-3-031-50482-2_9

[10] *V. V. Rykov, N. M. Ivanova, D. V. Kozyrev*, "Risk tree as an assistant tool for the decision-maker", *Proc. of 13th Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT)*, 2021, pp. 109-114. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631604

[11] *N. Ivanova, V. Vishnevsky*, "Reliability Modeling of the Tethered High-Altitude Platform Using Risk Tree", 2024 *8th Int. Conf. on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2025, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874899

Применение приближенных методов для решения задач оптимизации расписаний представленных в рекурсивном виде

Б. В. Куприянов, А. А. Рощин
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
kuprianovb@ipu.ru, rochinaa@ipu.ru

***Аннотация**. В работе рассматривается применение двух приближенных методов оптимизации некоторых задач теории расписаний. Методы муравьиной колонии и имитации отжига. Для описания задач используется аппарат рекурсивных функций. Задачи создаются генератором псевдослучайных ориентированных ациклических графов, что позволяет получить большое количество сгенерированных статистических данных.*

В ряде работ рассматривается использование аппарата рекурсивных функций для решения некоторых задач теории расписаний [1,2,3]. По определению, рекурсивная функция характеризуется тем, что значение ее вычисляется с помощью некоторого алгоритма. Это свойство позволяет инкапсулировать некоторые особенности задачи в набор функций и существенно расширять постановки задач. В работе [3] приводится расширение permutation flow shop задач (PFSP) в виде рекурсивных функций. PFSP формулируется следующим образом. Имеется множество $\mathcal{J}$ из n работ и множество $\mathcal{M}$ из m машин, выполняющих эти работы. Каждая работа j выполняется машиной k за время p_{jk}. Для машин определены отношения предшествования с использованием предиката and. Граф предшествования является ориентированным ациклическим графом с единственной завершающей вершиной. Граф, по сути, определяет суперпозицию рекурсивных функций. Permutation означает, что оптимальное расписание определяется только порядком выполнения работ.

Flow shop задача описывается парой рекурсивных функций:

$$C(\alpha,k)=\begin{cases} p_{\pi(\alpha),k}, & \alpha=1,\ k=1;\\ C(\alpha,k-1)+p_{\pi(\alpha),k}, & \alpha=1,\ 1<k\le m;\\ C(\alpha-1,k)+p_{\pi(\alpha),k}, & 1<\alpha\le n,\ k=1;\\ \max\{C(\alpha-1,k),C(\alpha,k-1)\}+p_{\pi(\alpha),k}, & 1<\alpha\le n,\ 1<k\le m; \end{cases}$$

и

$$\mathrm{C}_{and}(\alpha,k)=\max\{C(\alpha,pred_1(k)),C(\alpha,pred_2(k))\},$$

где $\alpha=1,2,\dots,n$ определяет порядковый номер работы в перестановке π и $pred_1, pred_2$ – функции предшествования машин, т.е. $k_1=pred_1(k)$ означает, что машина k_1 предшествует машине k. В случае простой цепочки машин $pred_1(k)=k-1$. На рис.1. приведен пример графа задачи (a), отношений предшествования (b) и вычисления значения функции $C(4,5)$ для 4-х работ и 5-и машин (c). Для простоты, рассмотрен вариант, когда $\pi(\alpha)=\alpha$.

В работе [3] описан метод ветвей и границ (B&B) для оптимизации расписания задачи, представленной в виде рекурсивных функций. Используется простой метод вычисления нижней границы и существует множество работ по более эффективному вычислению нижних границ. Однако, в любом случае точный метод ограничивает размерность решаемой NP-трудной задачи. В связи с этим, авторами рассматривается проблема применимости приближенных методов для решения PFSP, описанной в виде рекурсивных функций. Проводился анализ двух алгоритмов нахождения приближенного оптимального решения. Первый алгоритм – подражание муравьиной колонии (ACO) [4]. С начала девяностых годов, когда был предложен первый алгоритм оптимизации ACO, он привлекал внимание все большего числа исследователей, и теперь доступно множество успешных приложений. Более того, доступен значительный объем теоретических результатов, которые предоставляют полезные рекомендации исследователям и

практикам в дальнейшем применении ACO. Второй алгоритм – имитации отжига (SA) [5], популярный метод локального поиска, используемый для решения дискретных и, в меньшей степени, непрерывных задач оптимизации. Ключевой особенностью имитационного отжига является то, что он позволяет избежать локальных оптимумов, позволяя совершать движения в гору (т.е. движения, которые ухудшают значение целевой функции) в надежде найти глобальный оптимум. Для данного метода разработана теория сходимости. Оба алгоритма широко используются для решения задач оптимизации в теории расписаний.

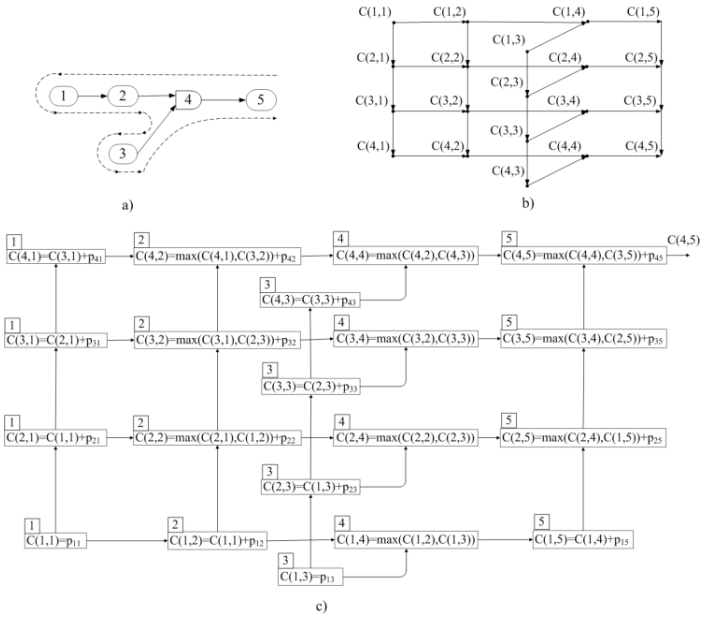


Рис. 1. Пример PFSP с функцией *and*

Для проведения тестирования алгоритмов разработан генератор псевдослучайных ациклических графов с возможностью задания ряда параметров.

Литература

[1] B. Kupriyanov, “Method of Efficient Analysis of the Recursive Conveyor Process Models” Automation and remote control, 2017, Vol. 78, No. 3, pp. 435-449.

[2] B. Kupriyanov, A. Lazarev, “Optimization of a Recursive Conveyor by Reduction to a Constraint Satisfaction Problem” Automation and Remote Control, 2021, Vol. 82, No. 11. pp. 1892-1906.

[3] B. Kupriyanov, A. Lazarev, A. Roschin, F. Werner, “On the Recursive Representation of the Permutation Flow Shop Scheduling Problem and Its Extension”, DOI: 10.20944/preprints 202411.2070.v1, 2024.

[4] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stützle, “Ant Colony Optimization. Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique”, IEEE Computational Intelligence Magazine, November 2006, DOI: 10.1109/MCI.2006.329691.

[5] D. Henderson, S. Jacobson, A. Johnson, “The theory and practice of Simulated annealing”,
DOI: 10.1007/0-306-48056-5_10, April 2006, In book: Handbook of Metaheuristics (pp.287-319).

Обобщенная квадратичная задача о назначении (GQAP) и ее применение для проектирования распределенной системы управления БПЛА

В. К. Акинфиев
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
akinf.valery@yandex.ru

***Аннотация**. Мы рассматриваем задачу проектирования структуры распределенной системы управления БПЛА, которая состоит в поиске наилучшем распределения функций управления БПЛА по пространственной системе узлов управления и техническим средствам. Данная задача в работе сведена к некоторому специальному случаю обобщенной квадратичной задачи о назначении (GQAP), которая сформулирована в терминах квадратичного целочисленного (булевого) программирование. Предлагаемый подход к решению задачи позволяет рассматривать ее и в многокритериальной постановке, которая предполагает поиск множества вариантов построения системы, содержащего не более n вариантов, отличающихся от наилучшего по оптимизируемому критерию не более чем на δ. Разработан полиномиальный алгоритм ее решения на основе метода ветвей и границ, приведены данные о времени поиска решения для различных стратегий движения по дереву вариантов и размерности задачи.*

I. Введение

В настоящее время происходит бурное развитие современной беспилотной летательной техники. Особую роль беспилотные летательные аппараты (БПЛА) приобрели при ведении локальных вооруженных конфликтов. Вместе с тем, эффективное и надежное применение БПЛА требует создания современных распределенных систем управления БПЛА. Распределенная система управления БПЛА включает бортовой управляющий комплекс и распределенную систему наземных и воздушных пунктов управления. Алгоритмы управления БПЛА включают набор последовательно выполняемых функциональных задач и процедур обработки информации.

За выполнение основных функциональных задач отвечает специальное программное обеспечение (СПО), которое устанавливается и функционирует на вычислительных средствах пунктов управления и предназначено для решения задач, связанных с планированием полета, управлением и контролем состояния БПЛА.

Бортовой управляющий комплекс БПЛА, как правило, решает задачи навигации и управления полетом БПЛА. В зависимости от конструктивных решений бортовой управляющий комплекс может включать информационно-управляющую систему, автоматическую систему управления полетом, аппаратуру сопряжения с оборудованием наземных пунктов управления, систему контроля и диагностики бортового оборудования.

В настоящее время все чаще используется групповое применение БПЛА, которое обеспечивает существенные преимущества по сравнению с одиночным применением. Вместе с тем в значительной мере усложняет процедуру управления БПЛА и требует решения более сложных задач управления. Сложность группового применения БПЛА обуславливают следующие факторы: появление еще одного иерархического уровня управления, обеспечивающего реализацию целевого назначения группы; сложность управления информационными потоками внутри группы и координации их взаимодействия (рис.1).

Бортовой управляющий комплекс БПЛА и распределенная система наземных и воздушных пунктов управления образуют систему взаимосвязанных между собой узлов управления. Задача проектирования подобных систем включает выбор алгоритмов реализации функций управления; выбор комплекса технических средств, обеспечивающих выполнение функций управления с учетом пространственного размещения комплекса и доступности узлов, распределение множества выполняемых функциональных задач по узлам системы с учетом взаимосвязи по

технологии обработки информации и управления. При этом должны учитываться технико-экономические характеристики системы, такие, как стоимость создания и эксплуатацию системы, оперативность, которая характеризует длительность выполнения цикла управления, вес и энергопотребление бортовой аппаратуры. Как будет показано далее данная задача может быть сведена к специальному случаю обобщенной квадратичной задаче о назначении (GQAP) [1].

II. Постановка задачи проектирования распределенной системы управления БПЛА

Мы здесь предполагаем, что задано множество локаций или узлов системы управления $j = \overline{1,J}$ и множество объектов (функциональных задач) $i = \overline{1,I}$. Рассматриваемая в работе задача проектирования распределенной системы управления БПЛА сведена к некоторому специальному случаю GQAP. Здесь, в отличии от QAP, в каждый узел системы может быть распределено несколько функциональных задач управления и возможность размещения функциональной задачи i в узле j зависит также от выбора варианта его оснащения комплексом технических средств. В задаче также учитываются взаимосвязи функциональных задач по объемам передаваемой информации между нами и очередности их выполнения. Далее мы приведем формализованную постановку этой задачи и метод ее решения.

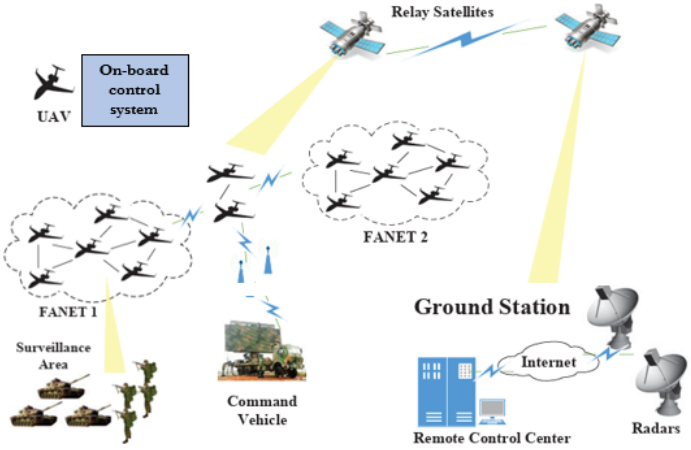


Рис.1. Пример распределенной системы управления БПЛА

Задача проектирования системы управления БПЛА включает совместный выбор варианта распределения функциональных задач между бортовым управляющим комплексом БПЛА и остальными узлами системы, выбор варианта реализации функциональных задач ($k = \overline{1,K_i}$), технических средств в узлах системы $l = \overline{1,L}$ и каналов связи между узлами для передачи информации между функциональными задачи.

Для формализации задачи введем следующие переменные:

$x_{ikjl} = 1$, если i-я функциональная задача решается по k-му варианту в j-м узле с помощью l-го технического средства и $x_{ikjl} = 0$ в противном случае; $x_{jl} = 1$, если j-й узел оборудуется l-м техническим средством и $x_{jl} = 0$ в противном случае; $x_{jj'} = 1$, если необходимо создать канал связи между узлами j и j' и $x_{jj'} = 0$ в противном случае.

Тот факт, что каждая функциональная задача должна быть распределена только в один узел управления системы и должен быть выбран только один вариант ее реализации и тип технического средства, учитывает ограничение:

$$\sum_{k,j,l} x_{ikjl} = 1\,, \qquad i = \overline{1,I} \tag{1}$$

Заметим, что переменные x_{jl} и $x_{jj'}$ зависят от выбора x_{ikjl} и используются для удобства записи аналитических выражений расчета различных характеристик вариантов построения системы управления:

$$x_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad \sum_{ik} x_{ikjl} \geq 1 \\ 0, & \text{если} \quad \sum_{ik} x_{ikjl} = 0 \end{cases}$$

$$x_{jj'} = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad \sum_{iki'k'} x_{ikjl} x_{i'k'j'l'} \geq 1 \\ 0, & \text{если} \quad \sum_{iki'k'} x_{ikjl} x_{i'k'j'l'} = 0 \end{cases}$$

Выпишем формулы для определения характеристик вариантов построения системы. Эксплуатационные затраты C включают эксплуатационные затраты на выполнение задач управления и затраты на передачу информации между узлами системы.

$$C = \sum_{i,k,j,l} c_{ikjl}\, x_{ikjl} + \sum c_{ij(i+1)j'}\, x_{ikjl} x_{(i+1)k'j'l'} \tag{2}$$

Время выполнения цикла управления T, характеризующее оперативность управления, вычисляется аналогично:

$$T = \sum_{i,k,j,l} t_{ikjl}\, x_{ikjl} + \sum_{i,k,j,l} t_{ij(i+1)j'}\, x_{ikjl} x_{(i+1)k'j'l'} \tag{3}$$

Заметим, что выражения (10) и (11) содержат квадратичные члены (произведение двух переменных).

Капитальные затраты K включают в себя стоимость технических средств в узлах системы, стоимость создания каналов связи между узлами системы, затраты на разработку алгоритмов выполнения задач:

$$K = \sum_{j,l} k_l\, x_{jl} + \sum_{j,j'} k_{jj'}\, x_{jj'} + \sum_{i,k,j,l} k_{ikjl}\, x_{ikjl} \tag{4}$$

Ограничение на общее энергопотребление в узлах системы, которое ограничивает назначение функциональных задач в каждый узел.

$$E = \sum_{ikl} E_l\, x_{ikjl}, \qquad j = \overline{1,J} \tag{5}$$

Исходную задачу оптимизации выбора варианта построения системы управления БПЛА запишем в следующем виде:

$$F_0\left(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}\right) \to \min \tag{6}$$

$$F_m\left(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}\right) \leq B_m \qquad m = \overline{1,M} \tag{7}$$

$$\sum_{k,j,l} x_{ikjl} = 1\,, \qquad i = \overline{1,I} \tag{8}$$

Функции F_0 и F_m задаются выражениями типа (2) - (5). Задача заключается в выборе искомых переменных $x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}$, которые минимизируют (6) при выполнении ограничений (7) и (8). В качестве (6) может быть выбран любой из показателей (2) - (5). Предлагаемый подход к решению задачи позволяет рассматривать ее и в многокритериальной постановке, которая предполагает поиск множества вариантов построения системы, содержащего не более n вариантов, отличающихся от наилучшего по оптимизируемому критерию не более чем на δ. Множество вариантов, обладающих перечисленными свойствами, обозначим через D_n^δ. Сравнение и выбор наиболее предпочтительного варианта на множестве D_n^δ производится с привлечением экспертов. Заметим, что при n=1 или δ=0 задача сводится к оптимизационной задаче (6) - (8). Задача поиска D_n^δ является более общей и, соответственно, более трудной, однако схема «ветвей и границ», которая используется в дальнейшем, позволяет определять искомое множество D_n^δ.

Следует заметить, что существует большое количество обзоров по методам решения задач QAP и GQAP, например, [1-6]. Различают две группы методов, используемые в задачах комбинаторной оптимизации, точные или эвристические.

Для решения рассматриваемой задачи, которая является специальным случаем GQAP, разработан полиномиальный алгоритм на основе метода ветвей и границ. Расчеты проводились с помощью ПК с процессором Intel Core ™, i5-52000, 2.20 GHz. Размерность задачи вычислялась как произведение I K J, где *I* - число задач, *K* - число вариантов реализации каждой функциональной задачи и *J* - число управляющих узлов системы; граф связей узлов был полный.

Решались задачи минимизации стоимости создания и эксплуатации и максимизации оперативности системы. В программе предусмотрено использование двух стратегий поиска: горизонтальной (выбор следующей вершины ветвления происходит из всего множества просмотренных вершин STR=0) и вертикальной (следующая вершина выбирается из множества вершин, просмотренных только на предыдущем шаге STR=1).

Анализировалась зависимость времени поиска оптимального решения и отношения числа просмотренных вершин дерева вариантов к их полному перебору от размерности решаемой задачи и стратегии поиска решения на дереве вариантов. Так, например, время решения задачи размерности 10x10x10 составляло порядка 350-400 секунд. При этом отношения числа просмотренных вершин к их полному перебору составляло в среднем величину порядка 0,015, что характеризует высокую эффективность разработанного алгоритма решения задачи. Как показали эксперименты, вертикальная стратегия поиска показала лучшие результаты.

III. Заключение

В работе предложен способ формализации и решения задачи проектирования структуры распределенной системы управления БПЛА. Задача состоит в поиске наилучшем распределения функций управления БПЛА по пространственной системе узлов управления и техническим средствам. Данная задача сведена к некоторому специальному случаю обобщенной квадратичной задачи о назначении (GQAP), которая сформулирована в терминах квадратичного целочисленного (булевого) программирование. Предлагаемый подход к решению задачи позволяет рассматривать ее и в многокритериальной постановке, которая предполагает поиск множества вариантов построения системы, содержащего не более n вариантов, отличающихся от наилучшего по оптимизируемому критерию не более чем на δ. Разработан полиномиальный алгоритм ее решения на основе метода ветвей и границ, приведены данные о времени поиска решения для различных стратегий движения по дереву вариантов и размерности задачи.

Литература

[1] *C. G Lee., Z Ma.* The generalized quadratic assignment problem //*Research Rep., Dept., Mechanical Industrial Eng*., Univ. Toronto, Canada, 2004, pp. M5S.

[2] *J. Bos,* A quadratic assignment problem solved by simulated annealing. *Journal of Environmental Management* 37 (2), 1993, pp.127–145.

[3] *B. Mans, T. Mautor, Roucairol, C.,* A parallel depth first search branch and bound algorithm for the quadratic assignment problem. *European Journal of Operational Research* 81, 1995, pp. 617–628.

[4] *M. Junger, V. Kaibe,* Box-inequalities for quadratic assignment polytopes. *Mathematical Programming* 91 (1), 2001, pp. 175–197.

[5] *B. Ramachandran, J. F. Pekny,* Lower bounds for nonlinear assignment problems using many body interactions. *European Journal of Operational Research* 105 (1), 1998, pp. 202–215.

[6] *S. E. Karisch, E. Cela, J. ClausenT.,* A dual framework for lower bounds of the quadratic assignment problem based on linearization. *Computing* 63, 1999, pp. 351–403.

Модель СМО с нетерпеливыми заявками для анализа переходных режимов в медицинских информационно-измерительных системах с неоднородными приборами

***А. Г. Дворецкий*[1], *Е. А. Барабанова*[2]**
[1]*МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, Россия,*
[2]*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,*
dvoretsky@sumirea.ru, elizavetaalexb@yandex.ru

***Аннотация**. В данной работе проводится исследование характеристик системы массового обслуживания вида MAP/M/1/N с нетерпеливыми заявками для повышения надежности медицинских информационно-измерительных систем, которые работают в режиме реального времени. Для анализа нестационарных характеристик такого рода систем была предложена математическая модель, которая будет адекватно описывать поведение неоднородных датчиков в медицинских приборно-компьютерных системах реального времени. В данном исследовании для решения уравнений Колмогорова предлагается использование метода матрицы преобразования вероятностей. Использование такого подхода позволяет получить основные характеристики рассматриваемой системы в нестационарном режиме: вероятность потерь, пропускную способность, длительность переходного режима и количество заявок в системе в определенный момент времени, что позволяет дать оценку производительности системы в условиях сбоев и неисправностей оборудования. Практическое применение такого исследования заключается в формировании подхода к построению системы поддержки принятия решений, предназначенной для обоснованного выбора конфигурации аппаратного обеспечения медицинских информационно-измерительных систем, а также для оценки ее надежности и функционирования при замене отдельных компонентов.*

I. Введение

Теория массового обслуживания широко применяется для математического описания множества задач, связанных с расчетом характеристик производительности телекоммуникационных систем, в том числе и в сфере здравоохранения, где использование надежных медицинских информационно-измерительных систем играет критически важную роль в обеспечении качественной и своевременной медицинской помощи [1].

Основное внимание исследователей, как правило, сосредоточено на поведении такого рода систем в стационарном режиме, однако с высоким развитием систем обработки информации и использования неоднородных датчиков в медицинских приборно-компьютерных системах [2] для более точной оценки характеристик возникает необходимость учитывать поведение систем в нестационарных режимах. Такой подход способствует оптимизации диагностического и лечебного процесса, позволяя медицинскому персоналу оперативно реагировать на изменения состояния больного и корректировать тактику ведения лечения в соответствии с актуальными данными.

Переходной режим работы может возникать при перезагрузке оборудования, включении и выключении аппаратного комплекса, переключения оборудования с основного канала на резервный в случаях сбоя и неисправности аппаратуры, а также в других ситуациях, которые сопровождаются изменением состояний системы. В таких условиях одной из важнейших задач является определение продолжительности переходного режима, а именно времени, необходимого для достижения стационарного состояния.

II. Постановка задачи

Целью данной работы является исследование переходного режима функционирования медицинской информационно-измерительной системы реального времени, описываемой с использованием модели СМО вида MAP/M/1/N с конечной очередью, коррелированным входным потоком и нетерпеливыми заявками, позволяющей оценить показатели производительности

медицинских информационно-измерительных систем, основанных на использовании неоднородных датчиков в условиях возникновения неисправностей, перезагрузке и сбоев оборудования. Структура возможных состояний системы представлена на рис. 1.

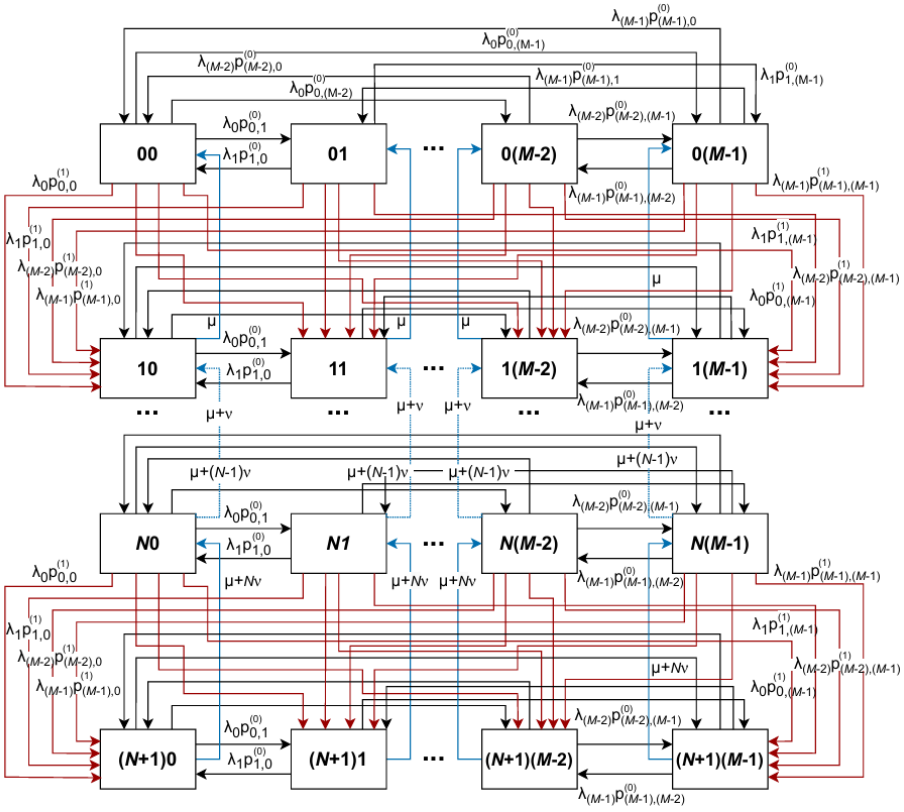


Рис.1. Граф переходов по состояниям системы *MAP/M/1/N* с нетерпеливыми заявками

Систему уравнений Колмогорова для рассматриваемой СМО вида MAP/M/1/N можно записать в матричной форме как:

$$\frac{d}{dt}\vec{P} = \mathbf{A}\vec{P} \tag{1}$$

где матрица **A** имеет следующий вид:

$$\mathrm{A}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_0^T & \mu\mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{D}_1^T & \mathbf{D}_0^T - \mu\mathbf{I} & (\mu+\nu)\mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_1^T & \mathbf{D}_0^T - (\mu+\nu)\mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{D}_1^T & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \mathbf{D}_0^T - (\mu+(n-1)\nu)\mathbf{I} & (\mu+n\nu)\mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{D}_1^T & \mathbf{D}_0^T + \mathbf{D}_1^T - (\mu+n\nu)\mathbf{I} \end{pmatrix} \tag{2}$$

В (2) μ — интенсивность обслуживания сетевого оборудования в соответствии с экспоненциальным законом распределения времени обслуживания; ν — интенсивность ухода нетерпеливых заявок. Блочные матрицы D_0^T и D_1^T описывают MAP-поток [3].

Решением системы в соответствии с методом [4] являются вероятности состояний системы, зависящие от времени. Полученные вероятностные характеристики обеспечивают возможность анализа показателей производительности системы в произвольный момент времени.

III. Заключение

Полученные в работе результаты можно использовать для расчета времени переходного режима и анализа возможного поведения системы в переходном режиме. Предлагаемый подход к описанию функционирования медицинских информационно-измерительных систем закладывает основу для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия инженерных решений, ориентированных на оптимизацию параметров при проектировании.

Литература

[1] *Синцева М. М., Кузьмин А. В., Дятлов Н. Е.* Система моделирования процесса обслуживания пациентов в медицинских учреждениях для поддержки принятия управленческих решений // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2022. №1 (41).

[2] *Buenrostro-Mariscal, R.; Santana-Mancilla, P.C.; Montesinos-López, O.A.; Vazquez-Briseno, M.; Nieto-Hipolito, J.I.* Prioritization-Driven Congestion Control in Networks for the Internet of Medical Things: A Cross-Layer Proposal. *Sensors* 2023, 23, 923.

[3] *Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И.* Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М.: Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА».– 2018. – 564 с.

[4] *Барабанова Е.А., Вытовтов К.А.* Аналитический метод исследования поведения системы массового обслуживания при скачкообразно-изменяющихся потоках информации // *Физические основы приборостроения*. 2021. Т. 10. № 1 (39). С. 36-47.

Information spreading in random graphs evolving by Norros-Reittu model with node deletion

M. N. Markovich[1], D. V. Osipov[2]
[1]V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia,
[2]Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia,
nat.markovich@gmail.com, osipov.dv@phystech.edu

Abstract. *The paper is devoted to the spreading of one message within a random graph evolving by a Norros-Reittu preferential attachment model (PAM). The PAM was introduced in a pioneer paper by Norros and Reittu (2006). By PAM a network may grow by attachment of new edges between a new node and existing nodes proportionally to their capacities, i.e. their mean node degrees. The number of edges between any two nodes follows a Poisson distribution whose mean is determined by the weights of the nodes. The evolution models with a random number of newly created edges are considered as the most realistic for modeling real networks. The PAM plays a double role. It forms new edges between new and existing nodes and propagates the message from an existing node having it to a node without it. In our study, we modify the Norros-Reittu model by allowing us to delete one of the existing nodes at each step of the evolution. The statement of the problem is to find a minimum number of steps when the message is lost. The result depends on the choice of the initial graph from which the evolution starts.*

I. Introduction

The Norros-Reittu preferential attachment model (PAM) generates an evolving random graph depending on the weights of its existing nodes [1]. At each step of the evolution a new node is added to the graph and it attaches to all existing nodes by random numbers of new edges. The number of edges between any two nodes follows a Poisson distribution whose mean is determined by the weights of nodes. The number of edges is created independently for each pair of the nodes and independently with regard to previous steps of evolution. At the same time, one of the edges of each pair of nodes is deleted with the probability depending on weights.

The evolution models with a random number of newly created edges are considered as the more realistic for modeling of real networks [2].

Let $\mathrm{G_n} = (\mathrm{V_n}, \mathrm{E_n}), n = 0,1,2, \ldots$ denote the sequence of random graphs evolved by an evolution model, where V_n is a set of nodes and E_n is a set of edges at evolution step n. We denote the cardinality of the set A as $\#A$. The evolution begins from the initial graph G_0 that is fixed. We may assume that G_0 contains a single node with the message.

Spreading of the information is an important problem in random networks. In our previous work [3], we used the Norros-Reittu model as a tool to spread a single message from a unique node used as the initial graph G_0 to new nodes appended to the graph. The probability mass functions of the number of nodes received the message S_{K^*} and the total number of nodes N_{K^*} at the random step $K^* \geq 1$ corresponding to a pre-fixed time T^* are derived. The distribution function of the proportion of nodes with the message S_{K^*}/N_{K^*} is also proved. The inter-arrival times between two steps are exponentially distributed and correspond to some common clock worked according to a Poisson process.

The node removal has not been considered. However, node deletion often occurs in random networks, such as peer-to-peer overlay networks. Removal of nodes may cause the loss of the message. Our objective is to find a first evolution step at which the message will be lost. We consider the modified Norros-Reittu model with the uniform deletion of nodes in each step, where G_0 may contain more than one node, but only one node has a message.

II. Statement of the problem

Our idea is to modify the Norros-Reittu model to one with uniform node removal. One of the existing nodes is deleted with all its edges at each evolution step. The attachment of a new node, the spread of the message, and the deletion of an existing node are assumed to occur simultaneously. Another

novelty concerns the choice of the initial graph. We may assume that it contains more than one node, but only one of the nodes has a message.

Our task is to obtain the risk of the message loss or the loss probability at the evolution step k.

III. Main results

In the simplest case, the evolution starts from a single node with a message. If no new edges are created at the first step and the only existing node with a message is removed, the message is lost at the first step. Otherwise, the message is lost as soon as a case without creating an edge appears.

Regardless of the choice of the initial graph, the message is lost in step k when two events occur: (a) a new edge does not attach to a single node with the message; (b) a single node with the message is deleted.

We proved the probability to loss the message in two lemmas where the initial graph consists of one node and of more than one node.

In the Norros-Rettu algorithm the number of new edges added to the new node is a Poisson random variable (r.v.) with the mean depending on capacities of nodes. The capacity implies the mean node degree, i.e. the mean number of edges of the node including self-loops. The capacities are assumed to be independent, strictly positive r.v.s with a common heavy-tailed distribution function F with regularly varying tail. In our simulation, we study the impact of the tail index of the latter distribution on the risk of losing the message.

IV. Conclusion

The modified Norros-Reittu model with uniform removal of one of the nodes in each step of evolution is considered. The probability of message loss and the stage of evolution in which this occurs have been found. The simulation results visually corroborate these theoretical considerations, demonstrating that smaller τ values (heavier tails in capacity distribution) promote better message retention. Furthermore, simulations indicate that both the initial network size N_0 and the initial fraction of nodes with the message $\#S_0/N_0$ play a significant role in information viability.

It is important to note that even with a preferential attachment model, the permanent deletion of nodes means that the fraction of nodes with the message may not only fail to reach 100%, but can also decrease over time. The message loss occurs if a node carrying the "last copy" of the message is deleted before it can transmit it to new or existing nodes. This highlights the critical role of node deletion in the process of information loss in the considered model.

Our future research may concern to further modification and study of the Norros-Reittu model. Namely, the initial graph containing a fixed or random number of nodes with a message may be considered. The probability to lose the message can be derived for such initial graphs. To approximate real networks by the Norros-Reittu model, we plan to propose an algorithm to estimate parameters of the model.

References

[1] *I.Norros, H.Reittu*, "On a conditionally poissonian graph process", *Advances in Applied Probability* 38**(1)**, 2006, pp.59-75.

[2] *T. Wang, S. Resnick*, "Poisson Edge Growth and Preferential Attachment Networks", *Methodol.Comput.Appl.Probab*. 25(8), 2023, pp. 59-75.

[3] *N.M.Markovich, D.V.Osipov*, "Information Spreading in Random Graphs Evolving by Norros-Reittu Model", arXiv: 2505.09713v1

On c-matrix method for bounding the rate of convergence for nonstationary queueing systems

A. I. Zeifman, I. A. Usov, A. L. Kryukova,
Ya. A. Satin, G. N. Shilova
Vologda State University, Vologda, Russia,
a_zeifman@mail.ru, iusov35@yandex.ru, kryukovaforstudents@gmail.com,
yacovi@mail.ru, shgn@mail.ru

***Abstract**. We consider time-nonstationary queuing systems and the corresponding inhomogeneous Markov chains. We describe an approach for obtaining the rate of convergence for such models and consider a number of classes of the corresponding queueing models.*

I. Introduction

General time-nonstationary queuing systems are considered, described by inhomogeneous continuous-time Markov chains. It is very important to study the presence of limiting characteristics of such systems and their computation. For such a study, the main point is to obtain estimates of the rate of convergence in the weakly ergodic case. The simplest and most convenient method is to use the logarithmic norm. However, the direct approach is not always applicable, and here the c-matrix method, first used in [1], can help, see also [2,3]. Here we provide a general description of this approach and consider a number of classes of models that can be studied using it. In particular, these are systems with catastrophes (disasters), including the recently considered and studied systems with several types of catastrophes [4,5]. The most important class of Markov chains that can be studied using the c-matrix method are quasi birth-death processes, see for example [6]. In this paper we will consider the description of the method and the models that can be studied using it.

II. Problem statement

We deal with the queue-length process for a general nonstationary Markovian queue. This is (inhomogeneous, in general) continuous-time Markov chain $X(t)$ with state space $\{0,1,...\}$ and the respective transition intensities $q_{ij}(t)$. We assume that all intensities are nonnegative and locally integrable on $[0,\infty)$ functions. Then the dynamic of the process is represented by the forward Kolmogorov system

$$\frac{dp}{dt} = A(t)p, \tag{1}$$

where $A(t)$ is the transposed intensity matrix of the process.

Instead of the standard procedure of exclusion of zero state we apply in first another approach. Consider two different solutions of (1) $p^*(t)$ and $p^{**}(t)$. Then there difference $z(t) = p^*(t) - p^{**}(t)$ is also a solution of (1), and sum of all coordinates of this solution equals to zero, $\sum_{i=0}^{\infty} z_i(t) = 0$. Moreover, instead of (1) we have now

$$\frac{dz}{dt} = A(t)z \tag{2}$$

Let $c_1(t), c_2(t), ...$ be nonnegative and locally integrable on $[0,\infty)$ functions. Consider the matrix $C(t)$ with identical elements $c_k(t)$ in k-th row, and put $B(t) = A(t) - C(t)$. Then the equations (2) and

$$\frac{dz}{dt} = B(t)z \tag{3}$$

has the same solutions. Let $D = diag(d_1, d_{2,...})$ be a diagonal matrix with positive entries d_i. Put $w = Dz$, then

$$\frac{dw}{dt} = B^*(t)w, \tag{4}$$

where $B^*(t) = DB(t)D^{-1}$.

Next, we can estimate the rate of convergence of the system (4) and compute the main limiting characteristics. The obtained results are applied to various classes of queueing systems, including those from [4,5,6].

References

[1] *Satin, Y. et al* (2018). Upper bounds on the rate of convergence for constant retrial rate queueing model with two servers. *Statistical Papers*, 59(4), 1271-1282.

[2] *Razumchik, R., Rumyantsev, A. S.* (2022). Some Ergodicity And Truncation Bounds For A Small Scale Markovian Supercomputer Model. In ECMS Proceedings, 324-330. *https://doi.org/10.7148/2022-0324*

[3] *Satin, Y. A.* (2021). On the bounds of the rate of convergence for M_t/M_t/1 model with two different requests. Sistemy i Sredstva Informatiki [*Systems and Means of Informatics*], 31(1), 17-27.

[4] *Li, J.* (2024). Birth–Death Processes with Two-Type Catastrophes. Mathematics, 12(10), 1468.

[5] *Zeifman, A., Usov, I., Kryukova, A., Satin, Y.* (2024, October). Bounds on the Rate of Convergence for a class of Birth–death Process with Two Types of Catastrophes. *In 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)* IEEE.

[6] *Usov, I., Satin, Y., Zeifman, A.* (2023). Estimating the Rate of Convergence of the PH/M/1 Model by Reducing to Quasi-Birth-Death Processes. *Mathematics*, 11(6), 1494.

Transient analysis of a finite source computer queueing network

S. A. Vostokova, Ya. A. Sergienko, A. I. Zeifman
Vologda State University, Vologda, Russia,
vostockova.sweta@yandex.ru, j13ana9d@yandex.ru, a_zeifman@mail.ru

Abstract. *We investigate the transient probabilities associated with the queue-length process in a finite-source queueing network with quasi-random input. Explicit exponential bounds on the rate of convergence to the limiting distribution are derived, and stability estimates are obtained under perturbations of system parameters.*

I. Introduction

Systems of a computer queuing network with a final source and transition probabilities which are associated with the number of user requests in such a service system are considered. The model that is used is described in stationary situation in [1]. The system investigation methods for estimating the system the rate of convergence and perturbation bounds are described in [2] and [3].

II. Problem statement

We analyze a finite-source queueing network with K terminals connected to a central processor. At most K users can simultaneously access the processor. When n requests ($0 \le n \le K$)) are being processed, $(K-n)$ users generate new requests at rate $(K-n)\lambda(t)$ (quasi-random input). Requests are transmitted/serviced by the processor in the order they arrive. Service times for all requests follow independent and exponentially random variable distributed with mean $\mu^{-1}(t)$, independent of the arrival process. The corresponding state probabilities satisfy the following Kolmogorov forward equations

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda(t)KP_0(t) + \mu(t)P_1(t)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -[\lambda(t)(K-n) + \mu(t)]P_n(t) + \lambda(t)(K-n+1)P_{n-1}(t) + \mu(t)P_{n+1}(t), \quad (1)$$

$$n = 1,2,\dots,K-1$$

$$\frac{dP_K(t)}{dt} = -\mu(t)P_K(t) + \lambda(t)P_{K-1}(t)\,.$$

The model under consideration can be formally described by the forward Kolmogorov system of differential equations

$$\frac{dP(t)}{dt} = A(t)P(t), \quad (2)$$

where the transposed infinitesimal matrix A(t) has the following structure:

$$\begin{pmatrix} -\lambda k & \mu & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \lambda k & -(\lambda(k-1)+\mu) & \mu & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda(k-1) & -(\lambda(k-2)+\mu) & \mu & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & -\mu \end{pmatrix} \quad (3)$$

We can set $p_0 = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} p_i(t)$ and rewrite (2) in the form

$$\frac{dP(t)}{dt} = A^*(t)P(t) + \lambda, t \ge 0, \quad (4)$$

Where $\lambda = (\lambda k, 0, 0, \dots)^T$ and

$$A^*(t) = \begin{pmatrix} -(\lambda(k-1)+\mu) - \lambda k & \mu - \lambda k & -\lambda k & -\lambda k & \dots & -\lambda k & -\lambda k \\ 0 & \lambda(k-1) & -(\lambda(k-2)+\mu) & \mu & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & -\mu \end{pmatrix} \quad (5)$$

Let D be an upper triangular matrix of the form

$$D = \begin{pmatrix} d_1 & d_1 & d_1 & d_1 & \cdots \\ 0 & d_2 & d_2 & d_2 & \cdots \\ 0 & 0 & d_3 & d_3 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & d_4 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \quad (6)$$

and we can rewrite system (4) in the reduced form

$$\frac{dx}{dt} = B^*(t) \cdot x(t) \quad (7)$$

Next, we estimate the rate of convergence of the system and the corresponding perturbation estimates. The results obtained will be used when considering a specific model.

References

[1] *B.Krishna Kumar, S.Balaji, K.Sethukumarasamy, R.Navaneetha Krishnan, R.Sankar.* Transient Analysis of a Finite Source Computer Queueing. Network: An Analytical Approach. Journal of the Indian Society for Probability and Statistics, 25, 2024, pp. 869–875

[2] *Zeifman, A., Satin, Y., Korolev, V., Usov, I.* Continuous-time Markov chains and models: Bounding via forward Kolmogorov system. in: *Handbook of Statistics*, *Markov Chains: Theory and Applications*, Elsevier, 52 (2025), 179 -210.

[3] *Zeifman, A., Korolev, V., Korotysheva, A., Satin, Y.* Bounds for inhomogeneous Markovian queueing systems with particularities in zero. M., 2016. IPI FRC CSC RAS

Исследование переходного режима трехфазной СМО при изменении интенсивностей обработки заявок

К. А. Вытовтов, Е. В. Шабанова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия
vytovtov_konstan@mail.ru, shabanova0927@gmail.com

I. Введение

С развитием новых способов передачи информации все более актуальна проблема исследования многофазных систем массового обслуживания. Так как параметры реальных СМО могут изменяться со временем, например, вследствие неисправностей обрабатывающих устройств, для адекватного описания их работы необходимо анализировать нестационарные характеристики систем в переходном режиме. В данной работе рассматривается трехфазная система массового обслуживания с общим буфером в переходном режиме, вызванном скачкообразными изменениями интенсивностей обработки заявок.

II. Постановка задачи

Исследуемая система состоит из трех фаз обработки с одним однолинейным обрабатывающим устройством на каждой и общего для них буфера размера N. Входящий поток является пуассоновским с интенсивностью обработки λ, интенсивности обслуживания на фазах равны μ_1, μ_2, μ_3, время обработки распределено экспоненциально.

Заявка, приходящая в систему, переходит в обработку в первой фазе, если она свободна, и в буфер — если фаза занята. После обработки фаза освобождается, и в нее приходит новая заявка из буфера, если он не пуст. Из первой фазы заявка переходит во вторую, если она свободна, или в буфер, если занята; из второй фазы заявка переходит в третью, если она свободна, или в буфер, если занята. После обработки в третьей фазе заявка покидает систему. Если в буфере находится N заявок, новые заявки, приходящие в занятые фазы, теряются. Интенсивности обработки заявок рассматриваемой системы изменяются скачкообразно.

Пример изменения интенсивностей обработки представлен на Рис.1.

Для системы определяются вероятности состояний, вероятность потерь заявок, производительность.

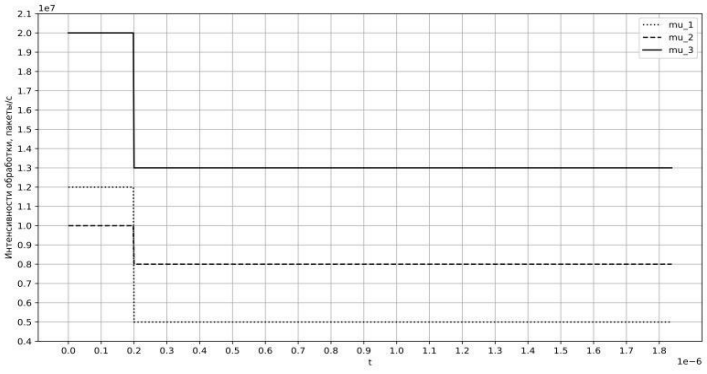


Рис. 1. График зависимости интенсивностей обработки от времени

III. Описание метода

Исследуемый процесс является марковским и описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова.

Для получения решений уравнений используется метод матрицы преобразования вероятностей [1]. Отдельно находятся матрицы преобразования $M(t)$ для начальных значений параметров и $M_2(t)$ для параметров после изменения. Вероятности состояний в переходном процессе описывается выражением

$$\underline{P}(t) = M_1(t_0)M_2(t - t_0)\underline{P}(t_0), \quad (1)$$

где t_0 — момент времени, в который происходит изменение параметров.

Потеря заявок происходит в случае, когда буфер заполнен, и в систему приходит новая заявка.

Производительность системы определяется по формуле

$$A(t) = \left(1 - P_{loss}(t)\right) \cdot \lambda \quad (2)$$

IV. Численный пример

Для иллюстрации работы системы построены графики ее характеристик в переходном режиме. Размер буфера взят $N = 3$, начальные интенсивности обработки μ_1, μ_2, μ_3 равны $12 \cdot 10^6, 10 \cdot 10^6, 20 \cdot 10^6$ пакеты/с соответственно, конечные — $5 \cdot 10^6, 8 \cdot 10^6, 13 \cdot 10^6$ пакеты/с соответственно, интенсивность входного потока равна $80 \cdot 10^6$ пакеты/с.

На Рис.2 приведен график зависимости вероятностей состояний системы от времени при изменениях интенсивностей, соответствующих графику на Рис.1, на Рис.3 — график зависимости производительности от времени. Характеристики системы до изменения интенсивностей считаются стационарными.

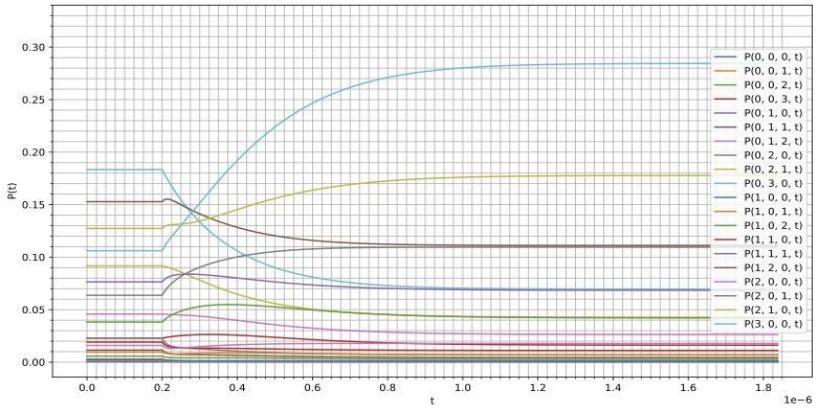


Рис. 2. График зависимости вероятностей состояний системы от времени

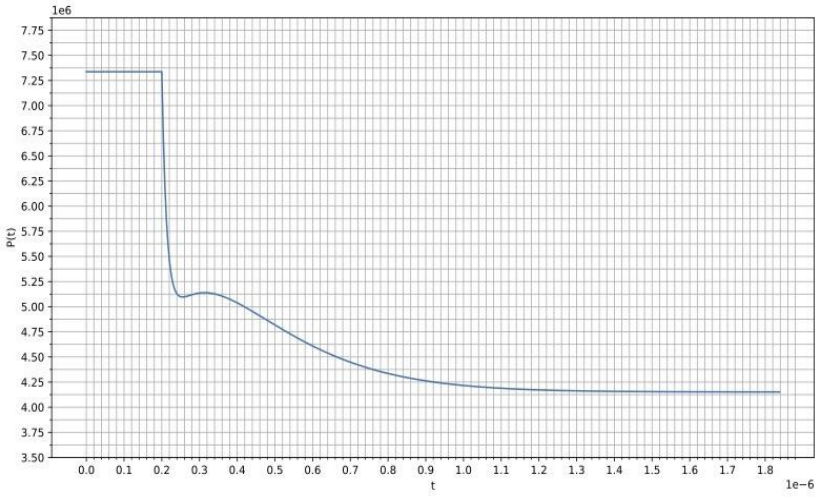


Рис. 3. График зависимости производительности системы от времени

Среди собственных значений матрицы СЛАУ, соответствующей системе уравнений Колмогорова, есть комплексно-сопряженные, из-за чего кривые графика некоторых из вероятностей состояний и производительности системы имеют волнообразный характер [2].

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00926, https://rscf.ru/project/25-29-00926/

Литература

[1] *Вишневский В. М.* Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях / *В. М. Вишневский, А.Н. Дудин, В. И. Клименюк*. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 564 с.

[2] *Vishnevsky V., Vytovtov K., Barabanova E., Semenova O.* Transient behavior of the M AP/M/1/N queuing system // *Mathematics*. 2021. V. 9. No. 2559. *https://doi.org/10.3390/math9202559.*

Variance reduction in floating random walk capacitance extraction

A. S. Rusakov[1], A. S. Sipin[2], A. N. Kuznetsov[2], V. I. Savelyev [1]
[1]Ventra, Moscow, Russia,
[2]Vologda State University, Vologda, Russia,
alexander.rusakov@gmail.com, vasily.savelyev@yandex.ru,
cac1909@mail.ru, pm_kan@mail.ru

***Abstract**. Same variance reduction methods for estimators of integrals for the normal derivative of the solution of the Laplace equation along the boundary of the domain are proposed. Statistical estimators of integrals are constructed on the trajectories of a Random Walk on the Spheres or a Random Walk on the Cubes. Numerical experiments demonstrate the efficiency of the developed variance reduction methods for calculation of the mutual capacitances of a system of conductors.*

I. Introduction

To compute capacitances of the complex design with predictable accuracy level Laplace's equation has to be solved. The boundary conditions determined by the shapes of the wires, vias, and contacts [1]. The most practical and efficient method for the calculation of the parasitic capacitances for large modern circuits is floating random walk (FRW). Monte Carlo integration with floating random walk does not require a mesh generation step. Wire, devices, and dielectric interfaces often follow Manhattan restriction which means that boundaries consist of rectangles which are orthogonal to the *x*, *y* and *z* axes.

Walk on the Cubes (WOC) method developed in [2] appeared to be practical and attractive one for the VLSI industry, and FRW method became an alternative to finite element and boundary element methods for the parasitic capacitance extraction. Runtime of the FRW method is a product of the cost of the single walk and the number of walks or trajectories needed to achieve capacitance value convergence. The number of walks depends on the variance of the capacitance estimator. In the works [1, 3-5], variance reduction techniques were applied to the WOC method.

We analytically prove that variance of capacitance estimation is decreased by using importance sampling scheme and quadratures with one random node, for the WOS method. We expect that theoretical results obtained for Walk on the Spheres (WOS) method can be, at some extent, applied to WOC method. We experimentally prove the efficiency of the variance reduction algorithm for the test structures.

II. Problem statement

Let $D_i, i = 1,2,...,m$, be conductors in inhomogeneous medium with piecewise constant permittivity $\varepsilon(x)$. Let Γ_i denotes the conductor surfaces, Γ_d is the union of the dielectric interfaces, φ_i is the values of the potential on Γ_i and q_i is the charge on Γ_i. Charges depend linearly on potentials [6]: $q_i = \sum_{j=1}^{m} C_{i,j}\varphi_j$. Here, $C_{i,j}$ is the mutual electrostatic capacitance of conductors *i* and *j*. Hence, $C_{i,j}$ is equal to q_i, when all potential $\varphi_k = 0$, if $k \neq j$, and $\varphi_j = 1$.

Using Gauss's theorem, we have unbiased estimator $\xi_0 = -\varepsilon(X)\sigma\dfrac{\partial\varphi}{\partial n}(X)$ for $C_{i,j}$. Here, a random point *X* is uniformly distributed on Γ (Gaussian surface), *n* is external normal to Γ, and σ is surface area of Γ.

To estimate the normal derivative, integral representation through the potential is used.

In WOS method we use integral representation due to the Poisson formula in the ball, which lies entirely in the region with the dielectric constant ε_i:

$$\frac{\partial\phi}{\partial n}(x) = \frac{1}{4\pi r^2}\oint_{S_r}\frac{3(y-x,n)}{r^2}\phi(y)d_yS, \qquad (1)$$

From here we obtain an estimator

$$\xi = -\varepsilon(X)\sigma\frac{3(\omega,n)}{4\pi r}\eta(X+r\omega) \tag{2}$$

for the capacitance $C_{i,j}$. Here, a random point X is uniformly distributed on Γ, $r = r(X)$, and ω is an isotropic vector (random unit vector). Random variable $\eta(y)$ is an estimator of $\varphi(y)$ on the Random Walk trajectory.

To model ω, one can use the following formula:

$$\omega = Z\vec{k} + \sqrt{1-Z^2}(\cos(2\,\pi\,\alpha)\vec{\imath} + \sin(2\,\pi\,\alpha)\vec{\jmath}), \tag{3}$$

if $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ are the unit vectors of coordinate axes, $\vec{k} = n(x)$, and α, Z are independent and uniformly distributed on [0,1], [-1,1], respectively.

We construct the new capacitance estimators that have a variance less than $Var(\xi)$.

III. Variance reduction

A. Importance Sampling

Replacing the distribution function of random variable Z (in formula (3)) from $p(z) = 1/2$ to $p(z) = |z|$, $z \in [-1,1]$, we obtain an estimator for capacitance $C_{i,j}$:

$$\tilde{\xi} = -\frac{3\varepsilon(X)\sigma}{4\pi r}\cdot\frac{(\omega,n)}{2|(\omega,n)|}\eta(X+r\omega) \tag{4}$$

The next statement is proved: There are exist constant $r_0 > 0$, that if a function $r(x) < r_0$, $(x \in \Gamma)$ then $Var(\tilde{\xi}) < Var(\xi)$.

We note, that application of the importance sampling algorithm developed above to the WOC method, gives the algorithm similar to one developed in [7], where modified transition function for the first cube was introduced.

B. Antithetic random variables method

Let $(\xi_1(k), \xi_2(k))$, $k = 1,2,...$ be a sequence of independent pairs of estimators $C_{i,j}$, which have the same distribution. Let N be even number, then $\hat{J}_N = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N/2}(\xi_1(k) + \xi_2(k))$ is an unbiased estimator for capacitance $C_{i,j}$, with variance $Var(\hat{J}_N) = \frac{Var(\xi_1)}{N}(1 + \rho(\xi_1,\xi_2))$, where $\rho(\xi_1,\xi_2)$ is the correlation between ξ_1 and ξ_2.

For the estimators $J_N = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\xi_1(k)$ and $Var(J_N) = \frac{Var(\xi_1)}{N}$ estimators ξ_1 and ξ_2 form an antithetic pair if they are equally distributed and have negative covariance. The estimator $\hat{J}_N$ obtained using antithetic pairs has less variance than the standard estimator J_N.

Example 1. Let ξ_1 be one of the basic estimators ξ or $\tilde{\xi}$. Vector $-\omega$ is obviously the random unit vector. Replacing ω with $-\omega$ in the basic estimator, we have the estimator ξ_2. In fact ξ_1 and ξ_2 are antithetic estimators for $C_{i,j}$, because they are identically distributed and $Cov(\xi_1,\xi_2) < 0$.

Example 2. From the random unit vector modeling procedure it is clear that the replacement Z by $-Z$ again gives the random unit vector $\tilde{\omega}$. It is obvious that the vector $\tilde{\omega}$ is symmetric to the vector ω relative to the plane orthogonal to the normal $n(X)$ and, therefore is an isotropic vector.

Let ξ_1 is one of the basic estimators ξ or $\tilde{\xi}$. Replacing ω with $\tilde{\omega}$ in the basic estimator, we have the estimator ξ_2. Variables ξ_1 and ξ_2 are antithetic estimators for capacitance $C_{i,j}$.

IV. Experimental Results

A. Experimental analysis of the variance reduction techniques for the WOS method.

Let us consider a model problem with 3 conductors, aligned to coordinate planes: C_1 with size 0.12 × 1.8 × 0.1, C_2 and C_3 with size 0.2 × 1.7 × 0.15, located over grounded plane at Oxy, in the homogeneous medium (Fig. 1). This structure can be considered as the simplest model of the MOSFET transistor for C-extraction of interconnect parasitics purposes.

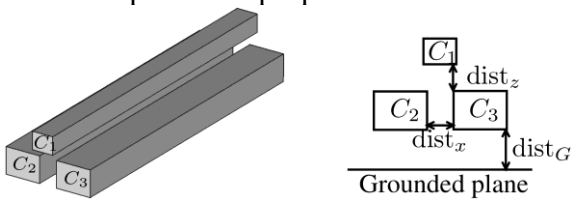


Fig. 1. Test configuration

In table 1 capacitance estimation, error estimation ($3\sigma/\sqrt{n}$) for C_1's self-capacitance (C_{11}) and mutual capacitance between C_1 and C_2 (C_{12}), and ratio of error estimation between non-modified and "enhanced" estimations are provided. For each method, estimation was performed on the same set of" starting points" at Gaussian surface. The total number of trajectories is the same in all cases.

Experimental results show that for the model task, two antithetic points notably reduce variance, especially, when Gaussian surface is close to conductor's surface. Both variants give almost the same results ("methods" 2 and 3). The importance sampling technique ("method" 4) reduces the variance too, and its effect almost irrespective to distance between the Gaussian surface and to the conductor. Both techniques could be combined and give better results ("methods" 5–6) than they are used individually.

Table 1. Estimations for model task (Fig. 1), $dist_G = 0.15$, $dist_x = 0.1$, $dist_z = 0.01$.

Method	C_{11}	C_{12}	Err_{11}/C_{11}	Err_{12}/C_{12}	$Err_{11}/Err_{11,1}$	$Err_{12}/Err_{12,1}$
1	$1.733\cdot10^{-10}$	$-7.864\cdot10^{-11}$	$3.981\cdot10^{-2}$	$4.347\cdot10^{-2}$	1	1
2	$1.697\cdot10^{-10}$	$-7.817\cdot10^{-11}$	$1.687\cdot10^{-2}$	$2.562\cdot10^{-2}$	0.42	0.59
3	$1.714\cdot10^{-10}$	$-7.755\cdot10^{-11}$	$1.667\cdot10^{-2}$	$2.569\cdot10^{-2}$	0.42	0.59
4	$1.695\cdot10^{-10}$	$-7.920\cdot10^{-11}$	$3.517\cdot10^{-2}$	$3.731\cdot10^{-2}$	0.88	0.86
5	$1.708\cdot10^{-10}$	$-7.737\cdot10^{-11}$	$1.419\cdot10^{-2}$	$2.202\cdot10^{-2}$	0.36	0.51
6	$1.704\cdot10^{-10}$	$-7.709\cdot10^{-11}$	$1.414\cdot10^{-2}$	$2.196\cdot10^{-2}$	0.36	0.51

Methods are numbered as follows:

1. Uniform sampling on the Gaussian surface, no antithetic;
2. Uniform sampling on Gaussian surface, 2 antithetic points selected symmetrically to start point (as in Example 1);
3. Uniform sampling on Gaussian surface, 2 antithetic points selected symmetrically to Gaussian surface's plane (as in Example 2);
4. Importance sampling without antithetic;
5. Importance sampling and 2 antithetic points selected symmetrically to start point;
6. Importance sampling and 2 antithetic points selected symmetrically to Gaussian surface's plane.

B. Numerical experiments with VLSI circuits

Here we provide empirical evidence of effectiveness of the proposed algorithms for the real VLSI designs. Test circuits are standard cells (MUX, XOR, register) and memory blocks, with a number of nets that range from tens to thousands. Technology processes are modeled by inhomogeneous medium with planar and conformal dielectrics. We use WOC implementation of the signoff capacitance parasitic extraction floating random walk field solver. Field solver handles arbitrary dielectric structure with the

signoff tool required accuracy. We compare relative runtime needed for convergence of the field solver. We set the standard error of the self-capacitance to 0.3% as termination criterion. In table 2 the cumulative speed up of field solver versus basis version is shown. We apply importance sampling (IS), Gaussian surface stratification (GStr), trajectory sampling optimization over strata (Opt. sampling), and antithetic variable (AV) techniques. Gaussian surface stratification with optimized iterative sampling produces 2x speed-up versus pure stratification method. It is worth noting that impact of the particular variance reduction algorithm on the runtime depends on design structure and the characteristics of the technology process.

Table 2. Relative speed-up of FRW WOC method with applied variance reduction methods.

Design	IS	IS+GStr	IS+GStr+Opt. sampling	IS+GStr+Opt. sampling+AV
circuit 1	1.30	1.58	2.96	3.13
circuit 2	1.32	1.52	1.97	2.02
circuit 3	1.27	1.30	1.77	2.25
circuit 4	2.30	2.70	3.80	8.17
circuit 5	3.10	4.65	7.75	8.99

V. Conclusion

Variance reduction algorithms for the parasitic capacitance extraction are developed. This includes importance sampling and antithetic variables methods. We provided theoretical analysis of importance sampling and antithetic integration for the WOS method. Experimental results demonstrate effectiveness of variance reduction techniques applied to random walk on spheres and to random walk on cubes methods.

References

[1] W. Yu and X. Wang, “Fast Floating Random Walk Method for Capacitance Extraction”. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 179–208. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-54298-5_10.

[2] J. Jere and Y. Le Coz, “An improved floating-random-walk algorithm for solving the multi-dielectric Dirichlet problem,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 41, no. 2, pp. 325–329, 1993.

[3] S. Batterywala and M. Desai, “Variance reduction in Monte Carlo capacitance extraction,” in 18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, Jan 2005, pp. 85–90.

[4] W. Yu and M. Mascagni, “Monte Carlo Methods for Partial Differential Equations with Applications to Electronic Design Automation”. Springer Nature Singapore, 2023.

[5] J. Huang, M. Yang, and W. Yu, “The floating random walk method with symmetric multiple-shooting walks for capacitance extraction,” IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 43, no. 7, pp. 2098–2111, 2024.

[6] W. Smythe, “Static and Dynamic Electricity”, 2nd ed. NY: McGraw-Hill, 1950.

[7] W. Yu, H. Zhuang, C. Zhang, G. Hu, and Z. Liu, “RWCap: A floating random walk solver for 3-D capacitance extraction of very-large-scale integration interconnects,” IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 32, no. 3, pp. 353–366, 2013.

К задаче моделирования визуально наблюдаемого виртуального пространства синтезированного имитаторами авиационного тренажёра

В. Р. Роганов[1], Б. С. Долговесов[2], С. Хилал[1], Л. Н. Пепел[1], Р. А. Ишуков[1]

[1]Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия,
[2]Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия,
vladimir_roganov@mail.ru, bsd@mail.ru, sonya.nina.helal@gmail.com, l.pepelinbox@mail.ru, ishukov@mail.ru

Аннотация. *Появление на борту летательных аппаратов тепловизоров поставило задачу разработать имитаторы тепловизоров для авиационных тренажёров и тренажёров операторов беспилотных летательных аппаратов. Целью разработки имитаторов тепловизоров является обучение лётчиков и операторов беспилотных летательных аппаратов решению навигационных задач связанных с распознаванием 3D-моделей реперных объектов для определения места нахождения модели летательного аппарата и направления его полёта в виртуальном пространстве, образованном имитатором визуальной обстановки (синтезирующем в режиме реального времени 3D-модели реперных объектов в зрительном диапазоне электромагнитных волн) и имитатором тепловизора (синтезирующем в режиме реального времени 3D-модели реперных объектов в двух режимах: ИК-диапазон монохромный окрас и ИК-диапазон мультиспектральный окрас). Целью данной работы предложить один из методов совмещения в одной и той же точке виртуального пространства трёх 3D-моделей одного и того же реперного 3D-объекта наблюдаемых в разных диапазонах электромагнитных волн.*

I. Введение

Лётчик во время полёта на летательном аппарате (ЛА), или оператор беспилотного летательного аппарата (БПЛА) решают задачи двух классов [1]. Считать с приборов кабинного оборудования необходимую информацию и визуально ориентируясь по наблюдаемой за кабиной ЛА 3*D*-изображению внешней среды принять решение и воздействуя на органы управления ЛА или БПЛА [2]. Второй класс задач решаемых лётчиком во время полёта ЛА – решать задачи самолётовождения [3].

II. Материалы и методы

Тогда авиационные тренажёры (АТ) и тренажёры операторов БПЛА должны разрабатываться с целью формирования заданных составляющих когнитивных модели *i*-го лётчика $X_i^{(ЛА)}$ или *i*-го оператора БПЛА $X_i^{(БПЛА)}$ в которых откладывается приобретённый ими в течении всей жизни времени T_i затраченного на предполётную подготовку и время реальных полётов. Обозначим опыт профессионального управления ЛА или БПЛА (отложенный в составляющих их когнитивной модели) как $X_i^{(У,ЛА)}$ или $X_i^{(У,БПЛА)}$ и опыт решения задач самолётовождения (отложенный в составляющих их когнитивной модели) $X_i^{(Н,ЛА)}$ или $X_i^{(Н,БПЛА)}$. Если во время полёта на ЛА или при управлении оператором БПЛА у них формируются $X_i^{(У,ЛА)}$, $X_i^{(У,БПЛА)}$, $X_i^{(Н,ЛА)}$, $X_i^{(Н,БПЛА)}$ с профессиональными навыками качество которых зависит от особенностей конкретного человека и T_i, то во время полёта на АТ или на тренажёре подготовки операторов БПЛА из-за невозможности создания полной модели как внешней среды, так и

моделей синтезирующих в режиме реального времени информацию, обработав которую лётчик или операторов БПЛА приобретает не только полезные навыки $X_i^{(У,ЛА)'}$, $X_i^{(У,БПЛА)'}$, $X_i^{(Н,ЛА)'}$, $X_i^{(Н,БПЛА)'}$, но и так называемые ложные навыки $X_i^{(У,ЛА)''}$, $X_i^{(У,БПЛА)''}$, $X_i^{(Н,ЛА)''}$, $X_i^{(Н,БПЛА)''}$ [4]. Таким образом

$$X_i^{(У,ЛА)} = X_i^{(У,ЛА)'} \bigcup X_i^{(У,ЛА)''}, \quad (1)$$

$$X_i^{(У,БПЛА)} = X_i^{(У,БПЛА)'} \bigcup X_i^{(У,БПЛА)''}, \quad (2)$$

$$X_i^{(Н,ЛА)} = X_i^{(Н,ЛА)'} \bigcup X_i^{(Н,ЛА)''}, \quad (3)$$

$$X_i^{(Н,БПЛА)} = X_i^{(Н,БПЛА)'} \bigcup X_i^{(Н,БПЛА)''}, \quad (4)$$

Тренажёры операторов БПЛА появились недавно, как и сами БПЛА [5]. В то время как первые АТ разработаны в XX веке [6] и к настоящему времени уже имеется достаточно материалов чтобы оценить их эффективность и определить направления их совершенствования [7].

Результаты исследований показали, что подавляющее число специализированных и комплексных АТ и тренажёров операторов БПЛА разработаны с целью обучения профессиональным навыкам пилотирования ЛА и БПЛА в ограниченном списке особых условии полёта, названных «учебными ситуациями» (УС). Причинами такого подхода к конструированию АТ и тренажёров операторов БПЛА являются:

1) требование Зайчика повысить $X_i^{(У,ЛА)'}$ за минимальное время без материального ущерба;

2) развитие науки и техники;

3) требование Заказчика, чтобы при полётах на АТ имелась возможность обучать лётчика на обучение лётчика решению навигационных задач $X_i^{(У,ЛА)'}$ и $X_i^{(Н,ЛА)'}$;

4) необходимость решать задачи компьютерного синтеза 3*D*-модели заданного Заказчиком района полётов размером не менее чем 400×400 км, что позволяет обучать $X_i^{(Н,ЛА)'}$;

5) появление на борту ЛА или БПЛА тепловизоров;

6) неточность рекомендаций – какие 3*D*-объекты, размещённые на заданном Заказчиком районе полётов должны считаться реперными.

Во всех случаях речь идёт о моделировании виртуальной среды для наблюдения в разных диапазонах электромагнитного излечения.

III. Заключение

1. Исследования возможностей обучать лётчиков и операторов БПЛА показали, что для этого целесообразно разрабатывать тренажёры минимизирующие привитие ложных навыков при обучении решению задач пилотирования и задач самолётовождения в ограниченном наборе учебных ситуаций.

2. Как показали результаты исследований проведённых сотрудниками выполняющих работы в ИАиЭ СО РАН (при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 1023032300221-9-1.2.1) совместно с творческим коллективом проводившим исследования в области компьютерной графики, разработка предложенного варианта виртуального пристрастна стала возможным после применения видеокарт Geforce для персональных компьютеров, успешно заменившие разрабатываемые ранее компьютерные генераторы изображения состоявшие из нескольких компьютеров и синтезирующие в режиме реального времени 3*D*-модели реперных объектов заданного Закатчиком района полётов.

3. Ограниченная производительность компьютерных генераторов изображения, разработанных на традиционной и новой элементной базе не позволяет синтезировать все различимые 3*D*-объекты на заданном Заказчиком районе полётов, поэтому необходимо используя искусственный интеллект составить список реперных 3*D*-объектов, которые должны быть размещены на 3*D*-модели района полётов и на основании этого решить какой компьютерный генератор изображения выбрать для разрабатываемых тренажёров.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00445, https://rscf.ru/project/25-21-00445/

Литература

[1] *V.R. Roganov, M.Yu. Mikheev, B.S. Dolgovesov., E.A. Asmolova*, “Basic concepts of building modern software and hardware systems of aviation training simulators to solve the tasks of training pilots”, II *International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Conference Proceedings. Ekaterinburg,* 2024, pp. 2159-2170.

[2] *V. Roganov, B. Dolgovesov, E. Asmolova, M. Chetvergova*, “Analysis of directions for improvement of flight simulators”, *E3S Web of Conferences.* 2023, pp. 04037.

[3] *В.Р. Роганов, М.Ю. Михеев,* “Управление ресурсами специализированной системы синтеза изображения района полетов для авиационного тренажера”, *Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 3, с. 48-60.*

[4] *V.R. Roganov, M.Yu. Mikheev* “Resource Management of a Specialized Flight Area Image Synthesis System for an Aviation Simulator*”, Aerospace Instrumentation.* 2023. No. 3, pp. 48-60.

[5] *M. Sato*, “Robust gain-scheduled flight controller for an in-flight simulator” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2020. Vol. 56. № 3, pp. 2122-2135.

[6] *L. Lu, M. Jump, M. Jones, D. Yilmaz, M. Pavel,* “Comparison of simulator platform and flight tasks on adverse rotorcraft pilot coupling prediction”, *Annual Forum Proceedings - AHS International. Ser. "70th American Helicopter Society International Annual Forum* 2014" 2014, pp. 2407-2423.

[7] *W.S. Lee, M.S. Tai, D.H. Kim, S.W. Choi, D.H. Park*, “Construction and evaluation of aerodynamic database for uam flight simulator integrationpart I: lift-cruise type*”, Journal of Computational Fluids Engineering.* 2024. Vol. 29. No 3, pp. 60-79.

Методы исследования устойчивости транспортной инфраструктуры при возникновении чрезвычайных ситуаций

Е. А. Барабанова, А. Л. Ковалев
МИРЭА - Российский технологический университет, г. Москва, Россия,
Elizavetaalexb@yandex.ru, al_13@bk.ru

Аннотация. *В рамках данной работы рассматриваются существующие методы исследования устойчивости транспортной инфраструктуры с позиций графового анализа, детерминированных и стохастических подходов, а также современных нейросетевых моделей восстановления транспортных сетей. В работе показано, что традиционные приложения теории массового обслуживания и сетей массового обслуживания к транспортным системам в основном ограничиваются исследованием стационарных режимов. В то же время для транспортных объектов обосновывается целесообразность использования переходных режимов сетей и систем массового обслуживания для оценки устойчивости процессов восстановления транспортной инфраструктуры при чрезвычайных ситуациях. На основе проведенного обзора предлагается подход к оценке устойчивости транспортной инфраструктуры с использованием вероятностных моделей сетей и систем массового обслуживания.*

I. Введение

Рост пространственной связанности территорий, усложнение мультимодальных транспортных систем и рост частоты экстремальных воздействий делают задачу обеспечения устойчивости транспортной инфраструктуры одной из ключевых в управлении транспортом. Устойчивость при этом понимается не только как надёжность отдельных объектов, но и как способность сети готовиться к сбоям, противостоять им, адаптироваться и восстанавливаться [1]. Согласно обзору Yang Yang [1], эволюцию состояния инфраструктуры при чрезвычайных ситуациях (ЧС) часто описывают кривой устойчивости «функциональность–время», а площадь под этой кривой за период восстановления рассматривается как интегральный индекс устойчивости.

Традиционно устойчивость транспортной инфраструктуры изучают на основе графовых моделей, детерминированных и имитационных моделей. Вместе с тем транспортные объекты естественно описывать как системы массового обслуживания (СМО), а транспортную сеть — как сеть массового обслуживания (СеМО), где устойчивость связана не только с топологией, но и с динамикой очередей и пропускной способности в узлах, особенно в переходных (нестационарных) режимах при возникновении и устранении нарушений.

II. Основная часть

Транспортные инфраструктуры очень часто описываются с использованием теории графов и сложных сетей, а также соответствующих метрик. Weili Zhang и Naiyu Wang [3] вводят метрику WIPW (Weighted Independent Pathways), отражающую количество и качество взаимонезависимых маршрутов между узлами, что позволяет оценивать структурную устойчивость к отказам рёбер. В исследованиях J. Wassmer, посвященных восстановлению дорожной инфраструктуры после пожара, и исследованиях E. Arango [4, 5] анализируются последствия блокировки дорог: изменения связности, перераспределение потоков и формирование «узких мест» (bottlenecks).

Для детерминированных и стохастических методов обзор [2] подчёркивает роль следующих показателей транспортной инфраструктуры: доступность, надёжность, время в пути, безопасность, а также учитывающих социально-экономические эффекты. При этом данные показатели в ряде работ агрегируются в интегральные значения. Для оценки показателей устойчивости широко используются методы многокритериальной оптимизации и риск-ориентированного анализа. Стохастические модели применяются для учёта неопределённости потоков и повреждений. В работах М. Погребняка [7] предложены численные методы анализа моделей движения транспортных потоков и диапазонов параметров, при которых система сохраняет устойчивые режимы движения.

Особенностью имитационных моделей (дискретно-событийные, агентные) является возможность проигрывать сценарии чрезвычайных ситуаций и восстановления с учётом ресурсов и последовательности работ. На этой основе формулируются задачи оптимизации порядка восстановительных мероприятий и распределения ресурсов. В качестве целевой функции обычно используются: минимизация суммарных потерь производительности, времени восстановления или максимизация интегрального показателя устойчивости. [8]

Развитие методов машинного обучения привело к появлению гибридных моделей, сочетающих графовое представление сети и обучаемые стратегии управления. В работе Xudong Fan. [6] предложена GCN-DRL-модель восстановления дорожной сети после землетрясения и наводнения: графовая сверточная сеть описывает состояние сети, а агент глубокого обучения с подкреплением выбирает последовательность восстановительных действий, максимизируя интегральный показатель устойчивости. Показано превосходство такой стратегии по сравнению с эвристиками и метаэвристическими алгоритмами.

При этом следует отметить, что в большинстве указанных подходов микроуровневая структура потоков и очередей в узлах либо описывается агрегированно, либо не учитывается.

Для более точного описания транспортных потоков и объектов транспортной инфраструктуры (полосы движения, станции, сортировочные центры и т. д.) используются модели СМО [9]. В работе Л. Афанасьевой и Е. Булинской [10] транспортные узлы и участки рассматриваются как атрибуты СМО и СеМО: заявки — транспортные средства, пассажиры или грузы; каналы обслуживания — полосы, ворота, погрузочно-разгрузочные устройства; очереди — заторы и скопления. При этом авторы рассчитывают стационарные характеристики моделей, такие как среднее время ожидания, длина очереди, вероятность отказа, пропускная способность, используя классические методы теории очередей.

Аналогичный подход применяется в [11] для моделирования городских пассажирских перевозок, где маршруты описываются как цепочки СМО, а остановки и станции — как узлы сети. М. Жарков [12] использует сеть СМО для анализа работы сортировочных станций и выявления «узких мест». В [13] поток транспортных средств трактуется как разомкнутая СМО, что позволяет исследовать устойчивость режимов движения при изменении интенсивностей.

Особенностями этих работ является оценка только стационарных или квазистационарных характеристик. Между тем устойчивость транспортной инфраструктуры критически зависит от поведения системы именно в переходных режимах, возникающих в моменты резкого изменения интенсивности входных потоков, внезапного уменьшения пропускной способности узлов сети, в результате переключений маршрутов, вызванных чрезвычайными ситуациями или другими нарушениями функционирования сети.

В общей теории массового обслуживания разработан ряд подходов к анализу переходных (нестационарных) режимов СеМО. В работах Е. Колузаевой [14] предложены методы анализа СеМО произвольной топологии в стационарном и переходном режимах на основе многомерных производящих функций и итерационных схем, позволяющих получать вероятностно-временные характеристики без полного решения системы уравнений Колмогорова. В работе [15] исследуется СеМО с ненадёжными системами в переходном режиме, что близко по постановке к задачам устойчивости под воздействием отказов. Исследование X. Ву [16] демонстрируют применение нестационарных СеМО к универсальному морскому порту: параметры потоков и обслуживания зависят от времени, что позволяет учитывать суточные колебания и перегрузки.

В транспортных приложениях зарубежные авторы также используют анализ нестационарных характеристик СМО. В работе [17] изучаются переходные режимы в СеМО, описывающих обслуживание авиатранспорта в узлах транспортной сети с разной интенсивностью обслуживания. G. Flötteröd и S. Osorio [18] предлагают аналитическую аппроксимацию переходных совместных распределений длины очередей в конечной марковской сети для анализа перегруженных городских дорожных сетей. В работе Ming Zeng, Wenming Cheng и Peng Guo [19] разрабатывается модель СМО в переходном

режиме для исследования заторов на воротах железнодорожного контейнерного терминала: въездные и выездные ворота рассматриваются как многоканальная система обслуживания, а динамика очередей анализируется с учётом временной изменчивости интенсивностей.

Таким образом, проведенный анализ мировой литературы показал, что исследования устойчивости транспортной инфраструктуры опираются главным образом на графовые и детерминированные модели, а показатели устойчивости определяются с использованием классических моделей описания стационарных режимов СМО и СеМО. В связи с этим научная новизна дальнейшего исследования заключается в использовании аппарата переходных режимов СеМО и СМО для описания изменения пропускной способности транспортной сети при различных сценариях чрезвычайных ситуаций и определения устойчивости транспортной инфраструктуры.

III. Заключение

В работе рассмотрены основные направления исследований устойчивости транспортной инфраструктуры и показано, что существующие графовые, детерминированные, стохастические, имитационные и нейросетевые подходы в основном оперируют агрегированными характеристиками и слабо отражают динамику очередей и загрузки узлов. Обосновано, что использование моделей СМО и СеМО в переходных режимах позволяет связать макроуровневые показатели устойчивости с микроуровневым поведением потоков и пропускной способности, создавая основу для более точного прогнозирования и управления устойчивостью транспортных систем.

Литература

[1] Yang Yang, Huang Haibo , Li Gen, Han Baorui, Yuan Zhenzhou , Ma Hang. A systematic review of resilience assessment and enhancement of urban integrated transportation networks // Journal of Transport Geography, Elsevier, vol. 129 https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104420

[2] Jonas Wassmer, Bruno Merz, Norbert Marwan. Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive Review // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. PP. 10.1109/TITS.2018.2883766.

[3] Weili Zhang, Naiyu Wang. Resilience-based risk mitigation for road networks // Structural Safety. 2016. V. 62. P. 57-65

[4] J. Wassmer, B. Merz, N. Marwan: Resilience of transportation infrastructure networks to road failures, Chaos, 34, 013124 (2024). DOI:10.1063/5.0165839

[5] Erica Arango, Maria Nogal, Ming Yang, Hélder S. Sousa, José C. Matos, Mark G. Stewart. Resilience assessment in post-wildfire recovery of road transport infrastructure. 2025. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111365

[6] Xudong Fan, Xijin Zhang, Xiaowei Wang, Xiong Yu. A deep reinforcement learning model for resilient road network recovery under earthquake or flooding hazard // Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2023. 4. 8. 10.1186/s43065-023-00072-x.

[7] Погребняк М. А. Моделирование движения транспортного потока /М. А. Погребняк // Математическое моделирование. — 2022. — Т. 34, № 10. — С. 95—109.

[8] Cui Xinhao, Li Bo, Zhang Siyue, Ji Ziguang, Wang Shitao, Luo Rui, Ren Yi, Xiao Yiyong (2025) Resilience-based restoration sequence optimization of disrupted transportation networks: A novel matheuristic approach. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 145. 104834. 10.1016/j.trd.2025.104834.

[9] Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленеко.— Москва : Наука, 1966.— 431 с.

[10] Афанасьева Л.Г., Булинская Е.В. Математические модели транспортных систем, основанные на теории очередей // Труды Московского физико-технического института, 2 (4). С. 6-21

[11] Сталович Н.С. К задаче математического моделирования городских перевозок пассажиров с использованием аппарата сетей массового обслуживания // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. науч.- техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 336–338.

[12] Жарков М.Л. Моделирование сортировочных станций // Надежность, том 21, №3, 2021. – С. 27–34

[13] Смирнов С. Е. Универсальные математические модели для обоснования главных параметров объектов дорожного сервиса / С. Е. Смирнов, Д. С. Круглов, В. А. Масленников // Инженерные и социальные системы : Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Том Выпуск 7. – Иваново : Ивановский государственный политехнический университет, 2022. – С. 104–110

[14] Колузаева Е.В. Анализ и оптимизация сетей массового обслуживания различной топологии // Теория вероятностей, математическая статистика и их приложения сб. науч. ст. Междунар. науч. конф., Минск, 22 февр. - 25 февр. 2010 г. Вып. 3. – Минск : РИВШ, 2010. – С. 153–157.

[15] Статкевич Н.С. Исследование сети массового обслуживания с ненадёжными системами в переходном режиме // Управление, вычислительная техника и информатика № 1(18) 2012.– С. 112–125.

[16] By X. З. Исследование универсального морского порта во Вьетнаме с использованием сети массового обслуживания / X. З. By // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2025. – Т. 7, № 1. – С. 72–83

[17] Peterson, Michael & Bertsimas, Dimitris & Odoni, Amedeo. (1995). Decomposition Algorithms for Analyzing Transient Phenomena in Multi-class Queueing Networks in Air Transportation // Operations Research. 43. 10.1287/opre.43.6.995. P. 995–1012

[18] Flötteröd G., Osorio C. An analytical approximation of transient joint queue length distributions in finite Marko vian queueing network // 2013. Proc. Triennial Symp. Transportation Anal. (TRISTAN).

[19] Zeng, Ming & Cheng, Wenming & Guo, Peng. (2014). A Transient Queuing Model for Analyzing and Optimizing Gate Congestion of Railway Container Terminals // Mathematical Problems in Engineering. 2014. P. 1-13

Секция 7

Школа молодых ученых: «Перспективные направления развития технологий управления и связи»

School of Young Scientists «Perspectives of information, control and communication technologies»

Мультиагентный алгоритм формирования микросетей в автономных электроэнергетических системах

С. П. Ковалёв, А. И. Полюхович
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
kovalyov@sibnet.ru, plxovichai@ipu.ru

***Аннотация**. Представлен новый алгоритм формирования микросетей в автономных локальных электроэнергетических системах на основе глубокого обучения с подкреплением. Задача обеспечения потребителей электричеством с учётом ограниченности ресурсов мобильных генераторов решается с помощью мультиагентного подхода. Алгоритм основан на увеличении числа агентов, принимающих решения о запитывании узлов сети, с одновременным сокращением времени их работы. В отличие от подхода, основанного на более продолжительной жизни агентов, данный подход позволит эффективно формировать микросети в электрических сетях, имеющих сложную топологию. Предложенный способ гарантирует соблюдение всех топологических ограничений без необходимости пересчитывать их на каждом шаге. Это позволяет сократить вычислительные затраты и ускорить процесс обучения с подкреплением. Программная реализация алгоритма выполнена с помощью платформы обучения с подкреплением Tianshou.*

I. Введение

Микросети – это локальные системы распределенной электроэнергетики, способные работать как автономно, так и в составе централизованной сети. Они сокращают потери при передаче электроэнергии и при этом обеспечивают надежность за счет комбинирования возобновляемых источников и мобильных дизельных генераторов.

Микросети гарантируют эффективное энергоснабжение изолированных объектов благодаря динамическому управлению мобильными источниками энергии и оптимизации зон их влияния. Решение подобных оптимизационных задач требует высокотехнологичного алгоритмического и программного обеспечения, в качестве основы которого в последние годы часто рассматривается глубокое машинное обучение с подкреплением. Оно позволяет создавать нейросетевые модели, способные быстро адаптироваться к различным топологиям и характеристикам сети, что делает эти модели особенно эффективными для управления микросетями, где необходимо учитывать множество переменных факторов – от колебаний энергопотребления до нестабильности генерации на основе возобновляемых источников энергии. Однако значительное время, затрачиваемое на требуемые вычисления, может считаться существенным недостатком данного метода решения.

В частности, глубокое обучение с подкреплением не используется повсеместно для формирования микросетей во многом ввиду сложности целевой топологии и большого числа возможных реконфигураций (переключений), требуемых для ее реализации в крупных энергосистемах. Предложенный метод способен преодолеть эти трудности: он гарантирует, что при любой схеме электроснабжения микросети будут питать максимально большое по мощности количество потребителей (с учетом их приоритетов), будучи изолированы друг от друга и имея радиальную топологию с центром в точке подключения соответствующего генератора. Для этого виртуальные агенты обучения с подкреплением назначаются коммутационным аппаратам (переключателям) – элементарным исполнительным механизмам реконфигурирования энергосистемы.

II. Разработка системы

Глубокое обучение с подкреплением в данном контексте реализовано через имитационную модель, состоящую из агентов и среды, в которой агенты совершают действие [1]. Среда характеризует текущее состояние сети электроснабжения (места подключения и мощности мобильных генераторов, список запитанных узлов), в то время как агенты пошагово принимают

решения о запитывании или не запитывании новых узлов. За каждое решение агент получает вознаграждение, пропорциональное приросту мощности и относительному приоритету узла за вычетом штрафов за нарушение эксплуатационных и топологических ограничений. В процессе обучения агенты исследуют различные стратегии запитывания энергосистемы, что позволяет нейронной сети обучаться максимально точной оценке совокупной полезности принимаемых агентами решений путем вычисления так называемой Q-функции. Для накапливания информации о среде агент следует ε-жадной стратегии.

Известен метод формирования микросетей на основе глубокого обучения с подкреплением, в котором число агентов соответствует числу мобильных генераторов [2]. Агенты виртуально перемещаются по системе вдоль линий электропередачи начиная от генераторов, до тех пор, пока их мощность не исчерпается либо все потребители не получат питание. Недостаток данного подхода заключается в том, что на каждом шаге обучения каждому агенту необходимо вычислять топологические ограничения для обеспечения радиальной топологии каждой микросети.

Предлагаемый метод, напротив, позволяет без явных сложных вычислений учитывать ограничения радиальной топологии и взаимной изолированности микросетей. В нем число агентов увеличивается: каждый агент сопоставляется переключателю в электросети, как показано на рис.1.

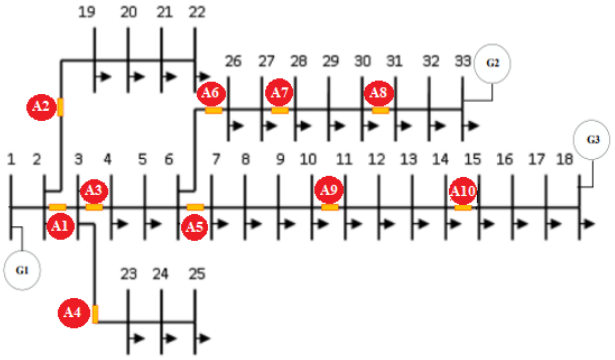


Рис.1. Расположение агентов обучения с подкреплением в сети электроснабжения

До начала обучения все переключатели разомкнуты, а агенты не активированы и готовы к помещению в очередь, чтобы выполнять действия в среде. Каждый шаг эпизода формирования микросетей состоит в извлечении одного агента из очереди ожидающих активации, принятии им решения о замыкании соответствующего переключателя исходя из текущего состояния энергосистемы, и последующей деактивации. При помощи нейронной сети ищется такой порядок активации агентов, который приводит к максимизации запитанной мощности. Эпизод завершается, когда очередь становится пустой. При этом в начале эпизода в очередь помещаются агенты, соответствующие всем переключателям, ближайшим к местам подключения генераторов. Эти агенты получают информацию о мощности соответствующего мобильного источника энергии.

Рассмотрим условия принятия активированным агентом решения о замыкании «своего» переключателя. А именно, переключатель остаётся разомкнутым и не приводит к активации каких-либо других агентов в следующих случаях:

1) на обоих концах линии, коммутируемой переключателем, отсутствует питание (так что замыкание переключателя не приведет к запитыванию каких-либо энергоприемников):

2) оба конца коммутируемой линии уже запитаны (так что замыкание переключателя вызовет появление кольца в микросети либо соединение двух микросетей, т.е. нарушение топологических ограничений);

3) суммарная мощность энергоприемников, непосредственно (через неотключаемые линии) подключенных к незапитанному концу коммутируемой линии, превышает текущую свободную мощность генератора, питающего второй конец.

Если ни один из этих случаев не имеет места, то агент замыкает переключатель. При этом энергоприемники, непосредственно подключенные к нему с незапитанного конца, получают питание, и их суммарная мощность вычитается из свободной мощности генератора, питающего второй конец. После этого агенты переключателей на линиях, непосредственно связанных с только что запитанным концом линии, помещаются в очередь на активацию.

При таком подходе, состав активируемых агентов по итогам очередного шага зависит от того, с какой стороны к замыкаемому на этом шаге переключателю поступает питание. Например, на рис. 1 переключатель A7 может получить мощность либо слева (если ранее был замкнут переключатель A6), либо справа (если ранее был замкнут переключатель A8). В первом случае будут запитаны узлы 28-30 и помещен в очередь на активацию агент переключателя A8, а во втором – запитаны узлы 26-27 и помещен в очередь агент A6. Здесь возможна ситуация, в которой переключатель, не замкнутый при получении его агентом мощности от одного генератора, становится замкнутым при получении мощности от другого генератора. Однако, если переключатель уже был замкнут, то он ни при каких обстоятельствах не может быть разомкнут в ходе эпизода.

Таким образом, радиальная топология микросетей соблюдается благодаря предположению о том, что агенты связаны с переключателями, а способ выбора очередного агента позволяет гарантировать изолированность микросетей друг от друга внутри электроэнергетической системы. Это позволяет оптимизировать работу алгоритма, увеличивая скорость вычислений за счёт априорно корректной логики принятия решений.

Архитектура алгоритма основана на нейронной сети вычисления функции полезности (Q-сети), имеющей три полносвязных скрытых слоя с функцией активации ReLU. Входной слой имеет такую же размерность, как список параметров состояния сети электроснабжения, так что для сети, изображённой на рис. 1, в нем будет 13 нейронов (имеется 3 генератора и 10 агентов переключателей). Скрытые слои для электросети такого масштаба содержат по 50 нейронов, а размерность выходного слоя соответствует размерности пространства действий (10 нейронов, по числу агентов). Процедуры обучения и применения такой Q-сети реализованы с использованием библиотеки Tianshou [3].

III. Заключение

Предложенный алгоритм может быть эффективен для формирования микросетей в топологически нетривиальных автономных электроэнергетических системах, содержащих многолучевые разветвления, закольцованные участки и другие сложные конфигурации. В настоящее время программная реализация алгоритма проходит отладку и апробацию на цифровых моделях различных систем такого типа. Даже для системы, изображённой на рис. 1, предложенный алгоритм выигрывает у упоминавшегося выше известного алгоритма обучения с подкреплением, в котором агенты соответствуют мобильным генераторам, по объему запитанной мощности. Например, для генератора G1 известный алгоритм строит микросеть из узлов 1-6 и 23-25, обеспечивая питанием 84.2% от суммарной мощности энергосистемы, а новый алгоритм обеспечивает 89.1% мощности, включая в эту микросеть узлы 1-3, 19-22 и 23-25.

Литература

[1] *Л. Грессер, В. Л. Кенг*. Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python. СПб.: Питер, 2022, 416с.,

[2] *M. A. Igder, X. Liang*. “Service Restoration Using Deep Reinforcement Learning and Dynamic Microgrid Formation in Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(5), 2023, pp. 5453-5472,

[3] *V. Mnih, K. Kavukcuoglu*, D. Silver. “Human-level control through deep reinforcement learning”, *Nature*, 518, 2015, pp. 529-533.

Разработка модели интегрального термоанемометра

А. А. Сухоруков
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
alex1102msk@yandex.ru

Аннотация. *Разработана модель интегрального термоанемометра для преобразования информационных сигналов в микроструйной технике. Интегральный термоанемометр устанавливается в микроструйный элемент напылением материала внутрь микроструйного канала.*

I. Введение

В современном мире невозможно представить свою жизнь без таких объектов, как самолеты, атомные электростанции, подводные лодки и др. Отказ в работе таких объектов может привести к непоправимым последствиям. Для предотвращения катастроф создаются резервные каналы управления на основе физических принципов неэлектрической природы. В тех случаях, когда требования к быстродействию не превышают десятков килогерц, а требования к условиям эксплуатации весьма жесткие и определяют возможное воздействие на объект сильных ударов и вибраций и др., резервирование электронной системы целесообразно осуществлять при помощи устройств струйной техники, работа которой основана на взаимодействии струй газа или жидкости по заданному алгоритму.[1][2]

Объектом исследования в настоящей работе является модель интегрального термоанемометра для преобразования информационных сигналов в микроструйной технике.

II. Разработка программно-аппаратного комплекса

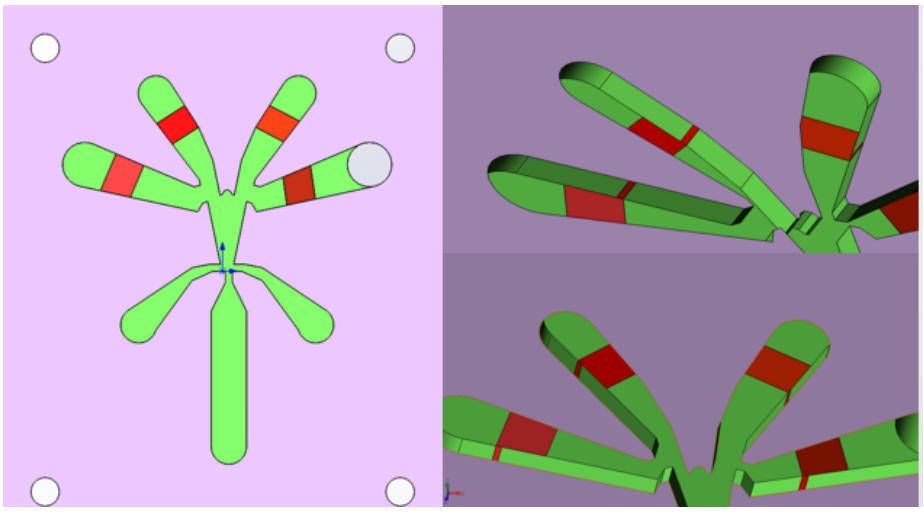


Рис.1. Микроструйный триггер

На рис. 1 представлена схема размещения интегрального термоанемометра внутри канала микроструйного триггера. В данной конфигурации микроструйный триггер оснащен интегрированными термоанемометрами (обозначены красным цветом), расположенными непосредственно в его каналах. Подобная компоновка измерительных элементов обеспечивает высокоточный мониторинг параметров потока в каждом канале микроструйного устройства, исключая необходимость применения дополнительных внешних средств измерений. Данное решение позволяет минимизировать погрешности, связанные с внешними воздействиями, и повышает достоверность получаемых экспериментальных данных.

В предлагаемом решении используется тонкоплёночный термоанемометр, состоящий из двух функциональных материалов, напыляемых непосредственно внутрь микроструйного элемента. Такая конструкция обеспечивает повышенную чувствительность за счёт разделения функций: один материал выполняет роль нагревательного элемента, а второй служит

термочувствительным датчиком. Это позволяет минимизировать взаимное влияние компонентов и повысить точность измерений. Ключевым преимуществом данной схемы является применение материалов с различными температурными коэффициентами сопротивления (ТКС), что улучшает детектирование изменений теплопередачи и обеспечивает высокое разрешение при измерении высокочастотных малых пневматических сигналов. Дополнительные защитные слои (например, оксидные плёнки) повышают стабильность и долговечность датчика, предотвращая деградацию нагревательного элемента под воздействием агрессивных сред или термических нагрузок. Благодаря использованию тонкоплёночных технологий (толщиной от десятков до сотен нанометров) реализуется миниатюризация сенсора, что делает его перспективным для применения в микроэлектромеханических системах (MEMS) и микрофлюидных устройствах. Таким образом, предложенная конструкция сочетает высокую чувствительность, компактность и устойчивость к эксплуатационным воздействиям, что расширяет её возможности в прецизионных измерениях микропотоков.

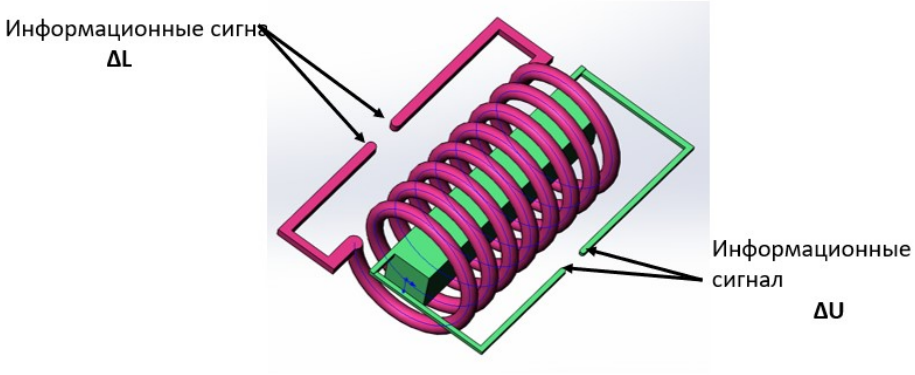


Рис. 2. Интегральный термоанемометр из магниторезистивных материалов

На рис. 2 представлена конструкция интегрального термоанемометра на основе магниторезистивных материалов, обладающая рядом преимуществ по сравнению с традиционными тонкоплёночными двухкомпонентными аналогами. Датчик состоит из индуктивной катушки, внутри которой размещён терморезистивный элемент. Подобная компоновка обеспечивает одновременное измерение двух независимых информационных параметров:

1. Изменение индуктивности катушки (ΔL) – обусловлено магниторезистивным эффектом, возникающим под воздействием внешних магнитных полей или температурных градиентов.

2. Изменение напряжения на терморезисторе (ΔU) – отражает динамику теплопередачи в исследуемом потоке.

Такая комбинированная схема измерения позволяет существенно повысить достоверность данных за счёт взаимной корреляции сигналов, а также компенсировать возможные погрешности, связанные с внешними воздействиями. Кроме того, использование магниторезистивных материалов обеспечивает высокую чувствительность и быстродействие датчика, что особенно важно при исследовании высокочастотных микропотоков в микрофлюидных и MEMS-системах. Таким образом, предложенная конструкция термоанемометра демонстрирует улучшенные метрологические характеристики и расширенные функциональные возможности по сравнению с классическими тонкоплёночными решениями.

III. Заключение

Разработана модель термоанемотрических датчиков, интегрированных во внутреннюю полость микроструйного канала. Данная конструкция обеспечивает возможность прямых высокоточных измерений параметров течения непосредственно в рабочей зоне микроструйного элемента, что исключает погрешности, связанные с косвенными методами диагностики. Использование встроенных термоанемометров позволяет получать локальные данные о

скоростных и температурных характеристиках потока с высоким пространственным и временным разрешением непосредственно в микроструйном элементе.

Литература

[1] *Балабанов А.В., Мамонтова А.А., Сухоруков А.А*. Research of Free Oscillations of Membranes by Means of Microfluidic Pulses / *Proceedings of 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023)*. Astrakhan, Russian Federation: IEEE, 2023. С. 1-4 https://ieeexplore.ieee.org/document/10347106.

[2] *Мамонтова А.А., Сухоруков А.А*. Разработка инструментальных средств для экспериментального исследования микроструйного генератора / *Труды 18-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами»* (УБС'2022, Челябинск). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. С. 105-114.

Исследование передаточных характеристик микроструйного расходомера на основе семикаскадного генератора

А. А. Мамонтова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
amamontova97@gmail.com

Аннотация. *Для микроструйного измерителя расхода, построенного на основе семикаскадного генератора, получены экспериментальные и аналитические передаточные характеристики по дифференциальному давлению для различных газов: гелий и углекислый газ. По полученным результатам доработано специализированное приложения для определения основных функциональных характеристик микроструйных устройств. Добавлена возможность определения передаточных характеристик по различным параметрам.*

I. Введение

Микроструйные устройства сегодня крайне востребованы. Благодаря своей надежности и устойчивости к экстремальным условиям (радиация, холод), они нашли применение в авиации, атомной энергетике и других областях. Особенно ценятся их возможности в создании резервных систем питания, предотвращающих аварии из-за сбоев электроники. Принцип работы этих устройств основан на точном управлении взаимодействием струй газа или жидкости.

В данной работе мы фокусируемся на исследовании микроструйного семикаскадного генератора. Он является ключевым компонентом для построения различных микроструйных схем. Поэтому важно тщательно исследовать его характеристики, чтобы в дальнейшем иметь возможность проектировать и рассчитывать параметры управляемых им устройств.

На базе данного объекта исследования разработана принципиальная схема стенда (рис. 1), по которой в дальнейшем был собран научно-исследовательский стенд для проведения экспериментов и снятия показаний.

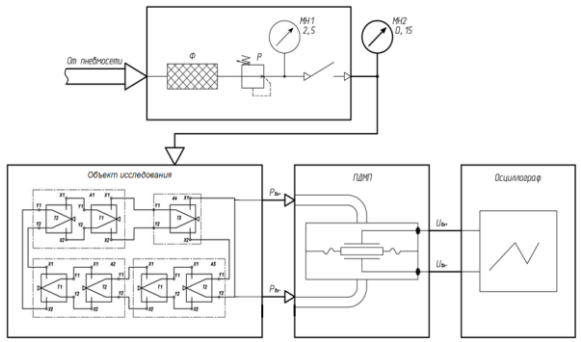


Рис. 1. Структурная схема научно-исследовательского стенда

II. Результаты исследования

На собранном научно-исследовательском стенде были проведены эксперименты с использованием гелия и двуокиси углерода. По результатам проведенных исследований были получены экспериментальные зависимости частоты от перепада давления (рис. 2), а также полученные данные были сравнены с раннее полученными результатами при использовании воздуха.

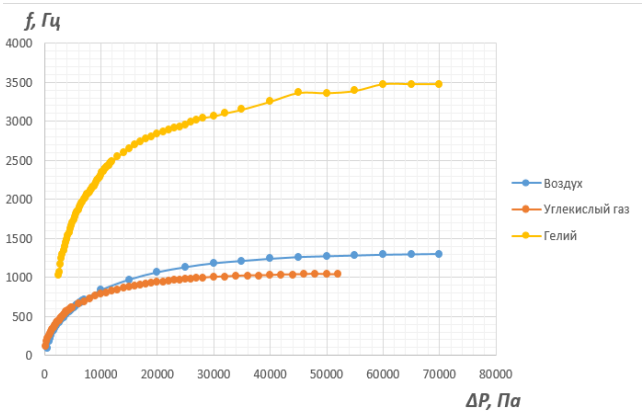


Рис. *2*. Экспериментальные зависимости частоты выходного сигнала от перепада давления для воздуха, углекислого газа и гелия

На основе полученной математической модели для воздуха (1) были подобраны подходящие коэффициенты и получены аналитические зависимости частотного выходного сигнала от перепада давления для двуокиси углерода и гелия.

$$f = f_{max}\left(1 - \frac{e^{-\frac{\Delta P}{\Delta P_a}} + e^{-\frac{\Delta P}{\Delta P_b}}}{2}\right) \quad (1)$$

где f – частота выходного сигнала, Гц; f_{max} – максимальная частота, Гц; ΔP – перепад давления для определенной точки, Па; ΔP_a – перепад давления в точке a, Па; ΔP_b – перепад давления в точке b, Па.

На рисунке 3 представлены экспериментальные и аналитические зависимости для двуокиси углерода и гелия.

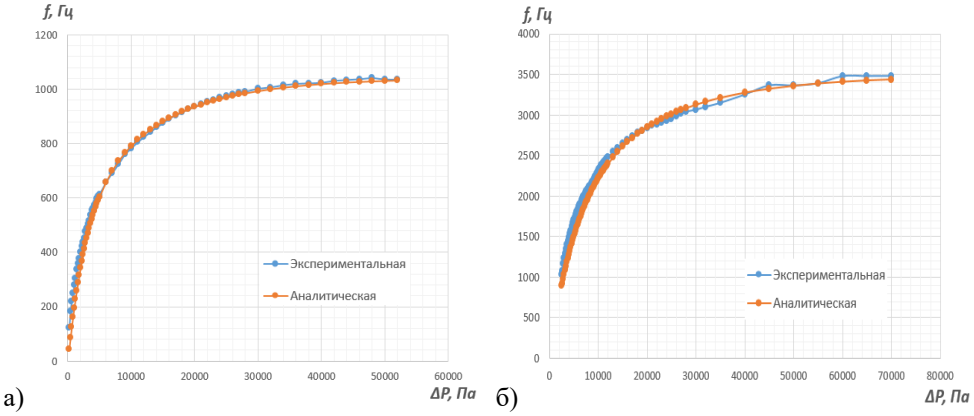


Рис. 3. Экспериментальная и аналитическая зависимости выходной частоты от перепада давления (а – двуокись углерода, б – гелий)

Используя данную математическую, было доработано специализированное приложение (СП) для определения основных функциональных характеристик микроструйных устройств. Разработан интерфейс СП с добавление возможности определения передаточных характеристик по различным параметрам (по частоте, по расходу). На рисунке 4 представлен интерфейс приложения.

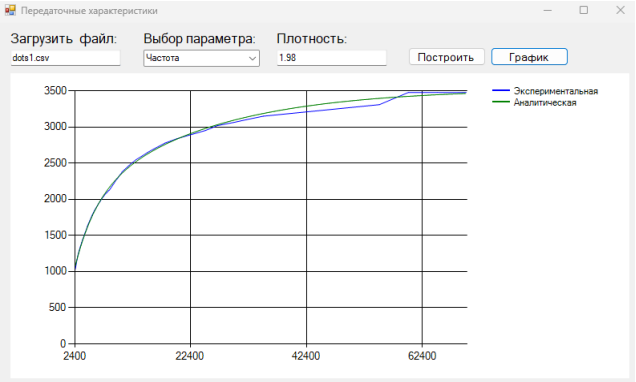


Рис. 4. Интерфейс специализированного приложения

Данное окно содержит область для ввода и выбора параметров и области вывода графиков.

III. Заключение

Таким образом, был проведен эксперимент для определения передаточных характеристик с различными газами: гелием и углекислым газом. Обработаны экспериментальные данные и получены аналитические зависимости частоты от перепада давления. Также доработано специализированное приложение, с добавлением возможности определения передаточных характеристик по различным параметрам: по частоте и по расходу.

Литература

[1] *Балабанов А.В., Касимов А.М., Фатеев В.Я.* Разработка и изготовление экспериментального образца семикаскадного микроструйного генератора // *Датчики и системы*. - 2021. - №1. -С. 63-68.

[2] *Балабанов А.В., Касимов А.М.* Разработка и исследование рабочих характеристик микроструйного генератора // *Датчики и системы*. - 2019. - №7-8. - С. 34-40.

[3] *Балабанов А.В., Мамонтова А.А*. Разработка программного обеспечения для автоматизации процедуры определения основных функциональных характеристик микроструйных устройств / *Материалы 8-й Международной научной конференции «Информационные технологии и технические средства управления»* (ICCT-2024, Владикавказ). М.: ИПУ РАН, 2024. С. 448-450.

[4] *Мамонтова А.А.* Расчетные модели микроструйного измерителя расхода газа / *Труды 20-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами»* (УБС'2024, Новочеркасск). Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2024. Т. 1. С. 366-371.

Реализация и процесс разработки системы распознавания лиц на языке Python

Ю. В. Лещинская, С. А. Лукашевич
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь,
iulianchik2703@mail.ru, lukashevich@gsul.by

***Аннотация**. В данной работе рассматривается процесс разработки системы распознавания лиц с использованием языка Python. Описаны этапы проектирования и реализации, включая выбор алгоритмов и предварительную обработку изображений. Реализованы два программных модуля: один предназначен для формирования базы кодировок лиц на основе заранее подготовленных изображений, второй – для их последующего распознавания в видеопотоке в режиме реального времени. Для выполнения задач идентификации были использованы методы HOG, выделения ключевых точек и сверточные нейронные сети. Проведено тестирование, показавшее высокую точность идентификации при различных условиях. Приведены результаты испытаний и выполнен анализ полученных данных. Работа может быть использована как основа для построения систем контроля доступа и обеспечения безопасности в учреждениях различного типа.*

I. Введение

С развитием технологий обработки изображений и искусственного интеллекта в последние годы наблюдается стремительный рост популярности биометрических методов идентификации, в частности – распознавания лиц. Эта технология представляет собой один из наиболее перспективных и удобных способов аутентификации личности. Система распознавания лиц по видеопотоку в режиме реального времени позволяет идентифицировать человека без его активного участия – достаточно лишь, чтобы он оказался в поле зрения камеры. Такой подход значительно упрощает процесс контроля доступа, исключает человеческий фактор, а также решает проблему утери, подделки или забытого идентификатора, ведь лицо невозможно оставить дома или передать другому.

II. Алгоритмы и реализация

В разработке использовались методы гистограммы направленных градиентов (HOG) [1], сверточной нейронной сети (CNN) [2] и опорных векторов (SVM). Алгоритм HOG отвечает за детекцию лиц, CNN — за извлечение признаков, а SVM — за классификацию.

Формула градиента:

$$G\,(x,y) = H\,(x\,+\,1,y) - H\,(x,1,y), \tag{1}$$

$$G\,(x,y) = H\,(x,y\,+\,1) - H\,(x,y\,-\,1), \tag{2}$$

$$\mathrm{G} = \sqrt{G_x(x,y)^2 + G_y(x,y)^2}, \tag{3}$$

$$\theta\,(\mathrm{x},\mathrm{y}) = tan^{-1}\left(\frac{G_y(x,y)}{G_x(x,y)}\right), \tag{4}$$

Результаты обработки изображения алгоритмом с применением разных масок можно наблюдать на рисунке 1(а-г).

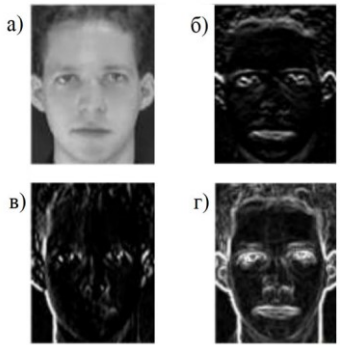


Рис. 1. а – Изображение до применения фильтров;
б – результат применения горизонтальной маски;
в – результат применения вертикальной маски;
г – результат применения вертикальной
и горизонтальной маски одновременно)

Ключевые этапы реализации:

1. Использование библиотек OpenCV [3], NumPy, Pickle и dlib;

2. Формирование словаря кодировок лиц с помощью библиотеки face_recognition [4] и сохранение в файл dataset_faces.dat (модуль data.py);

На рисунке 2 показана папка «data» и ее содержимое.

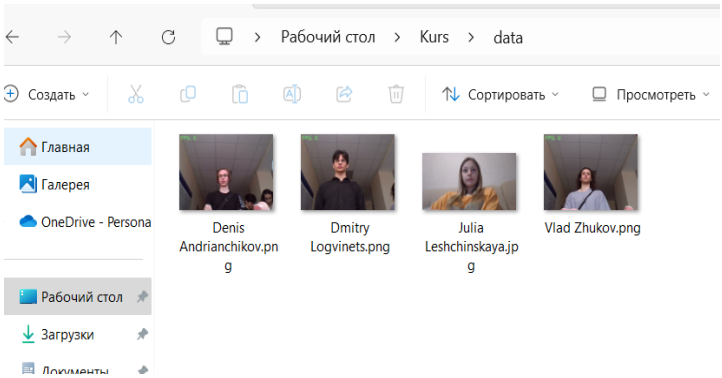


Рис. 2. Содержимое каталога "data"

3. Обнаружение и распознавание лиц в видеопотоке, сравнение кодировок с базой и визуализация результатов (recognition.py).

III. Результаты тестирования

Реализованная система успешно прошла тестирование. Были распознаны лица из базы и определены «неизвестные» лица. Система выдерживает нагрузку видеопотока с частотой 20–30 FPS, что подтверждает её применимость в реальных условиях (рисунок 3).

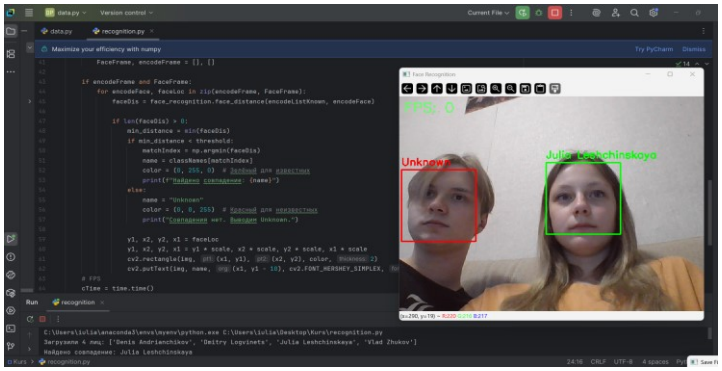


Рис. 3. Результат проверки системы распознавать несколько лиц

IV. Заключение

Разработанная система демонстрирует высокую эффективность и точность при реальном применении. Использование HOG+CNN+SVM оказалось оптимальным решением с точки зрения баланса между качеством и производительностью. Работа может быть расширена за счёт внедрения 3D-идентификации или интеграции с базами данных организаций.

Литература

[1] *А. Титов*" Технология распознавания лиц от А до Я", 2017.
[2] *Саймон Хайкин* "Нейронные сети: полный курс", 2-е издание, 2020. – 1104 с.
[3] *A. Rosebrock* "OpenCV EigenFaces for face recognition", 2021.
[4] *A. Geitgey* "Face recognition", 2017.

Методы, библиотеки и среды для анализа данных с использованием машинного обучения

М. С. Загорникова, С. А. Лукашевич
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь,
mszagornikova@gmail.com

Аннотация. *В статье рассматриваются современные подходы к анализу данных с использованием методов машинного обучения. Основное внимание уделено программным инструментам и библиотекам Python: Anaconda, NumPy, Pandas, Scikit-learn, TensorFlow и PyTorch. Подробно описаны ключевые методы анализа данных: отбор признаков, кросс-валидация и настройка гиперпараметров моделей. Особое внимание уделено методам визуализации результатов, включая линейные графики, тепловые карты и 3D-визуализации.*

I. Введение

Современный анализ данных, особенно в научных исследованиях, всё чаще опирается на методы машинного обучения. Этот процесс требует не только теоретических знаний, но и владения специализированными инструментами. В данной статье рассматриваются ключевые аспекты работы с данными: от выбора программного обеспечения до методов визуализации результатов.Особое место в процессе анализа данных занимает язык программирования Python, который благодаря своей простоте и богатой экосистеме библиотек стал стандартом в области анализа данных. Разработанный в конце 1980-х годов и впервые опубликованный в 1991 году, Python предлагает исследователям мощные средства для автоматизации обработки данных.

Anaconda – дистрибутив Python, который включает в себя множество популярных библиотек для анализа данных и имеет удобный пользовательский интерфейс. Преимущество Anaconda состоит в том, что все библиотеки идут комплектом и не конфликтуют между собой.

Далее рассмотрим библиотеки, которые используют для анализа данных. NumPy – это библиотека с открытым исходным кодом для языка программирования Python. Она предлагает эффективный многомерный контейнер данных и предоставляет возможность определять произвольные типы данных. Является основной математической библиотекой для работы с данными, положенная в основу других библиотек для работы с задачами машинного обучения или анализа данных: Pandas (работа с табличными данными), SciPy (методы оптимизации и научные расчеты), Matplotllib (построение графиков) [1]. Scikit-learn – это популярная библиотека для машинного обучения на языке Python. Она предоставляет простые и эффективные инструменты для анализа данных и построения моделей машинного обучения. Библиотека включает в себя множество алгоритмов для классификации, регрессии и кластеризации, таких как линейные модели, деревья решений, случайные леса, SVM, K-ближайших соседей и многие другие [2]. Scikit-learn предлагает инструменты для предобработки данных, включая нормализацию, стандартизацию, кодирование категориальных переменных и обработку пропущенных значений. Библиотека предоставляет функции для оценки качества моделей. Поддерживает создание пайплайнов, что позволяет объединять несколько шагов обработки данных и обучения модели в один объект, упрощая процесс разработки. Библиотека хорошо интегрируется с другими популярными библиотеками Python, такими как NumPy, SciPy и Matplotlib, что делает её удобной для использования в научных и исследовательских проектах. TensorFlow и PyTorch – это библиотеки для глубокого обучения. Они позволяют создавать и обучать сложные нейронные сети. TensorFlow разработан компанией Google. Ориентирован на графы вычислений. Модель сначала строится в виде графа, а затем выполняется. Широко используется в промышленности и для разработки масштабируемых приложений. Имеет хорошую поддержку для мобильных и веб-приложений через TensorFlow Lite и TensorFlow.js. Предоставляет высокоуровневый API, что упрощает создание и обучение моделей. Имеет обширную документацию и множество обучающих материалов. PyTorch разработан Facebook

(Meta). Ориентирован на динамические вычислительные графы. Позволяет изменять граф во время выполнения, что делает его более гибким.

II. Алгоритмы и реализация

Эффективная обработка физических данных методами машинного обучения требует применения специализированных методик, направленных на построение качественных моделей и оценку их результатов. Одним из ключевых этапов предобработки является отбор информативных признаков, то есть идентификация наиболее значимых признаков из сотен или тысяч доступных переменных. Это позволяет решать проблемы избыточности и шума, сокращает время обучения, а также повышает точность и интерпретируемость моделей. Для отбора признаков используются различные методы, включая фильтрацию (автоматическое удаление признаков с высоким процентом пропусков, низкой вариативностью или сильной корреляцией, например, через библиотеку feature-selector), встроенные методы (интеграция отбора в алгоритмы обучения, например, L1-регуляризация), а также оберточные методы, предполагающие итеративную оценку важности признаков с использованием моделей, таких как LightGBM.

После отбора признаков важным этапом является кросс-валидация, которая служит методом оценки устойчивости модели на независимых данных и предотвращает переобучение. Наиболее распространённой является K-кратная кросс-валидация, при которой исходные данные делятся на k частей (обычно 5–10 сегментов), и последовательно каждая часть используется как тестовая выборка, а остальные — для обучения. Итоговая оценка формируется усреднением метрик, по всем итерациям.

Завершающим критически важным этапом является оптимизация гиперпараметров, то есть настройка конфигурационных параметров, задаваемых до обучения (например, архитектура сети, скорость обучения, регуляризация). В отличие от параметров модели, которые представляют собой внутренние веса, оптимизируемые в процессе обучения (например, коэффициенты нейронных связей), гиперпараметры настраиваются заранее. Поиск оптимальных значений гиперпараметров обычно осуществляется с помощью методов GridSearch или RandomizedSearch для достижения максимальной производительности модели.

Наглядное представление данных -- важнейший этап анализа. Линейные графики идеально подходят для демонстрации изменений во времени, а столбчатые диаграммы помогают сравнивать разные категории. Для выявления взаимосвязей между переменными используют диаграммы рассеяния как показано на рисунке 1.

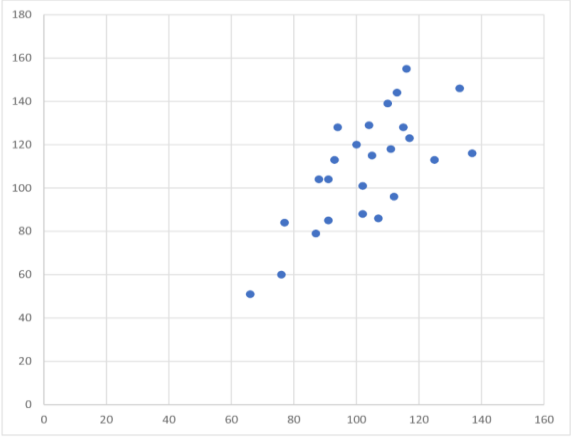


Рис. 1. Диаграмма рассеяния

Тепловые карты отлично показывают структуру матричных данных как показано на рисунке 2.

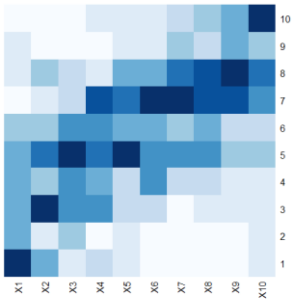


Рис. 2. Тепловая карта

В последние годы всё большую популярность приобретают интерактивные и трёхмерные визуализации (рисунок 3). Они позволяют исследователям буквально "погружаться" в данные, рассматривая их с разных сторон и выявляя скрытые закономерности.

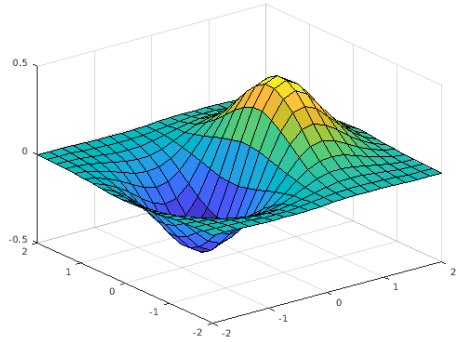


Рис. 3. Трёхмерная визуализация

III. Заключение

Современный анализ данных – это сложный, но увлекательный процесс, требующий комплексного подхода. От выбора инструментов до интерпретации результатов - каждый этап важен для получения достоверных выводов. Использование Python и его библиотек в сочетании с грамотным применением методов машинного обучения открывает широкие возможности для исследователей в самых разных областях науки и практики.

Литература

[1] *И. Шамаев* Язык программирования Python 3. Обзор библиотек принципов modules - Python 3 | Data Science | Нейронные сети | AI - Искусственный Интеллект. Доступно по ссылке: *https://python.ivan-shamaev.ru/overview-python-programming-language-modules-library-principles/*

[2] Skypro. Фреймворк и программа искусственного интеллекта. Доступно по ссылке: *https://sky.pro/wiki/python/frejmvork-i-programma-iskusstvennogo-intellekta/*

Модификация механизма комплексного оценивания рисков сложных организационных систем для обоснования выбора пар компонентов для агрегации

А. С. Рей
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
a.rey@ipu.ru

Аннотация. *В любой организационной системе присутствует множество рисков и характеризующих их элементов. Однако подавляющее большинство исследований, посвященных решению задач управления рисками, в частности его оценке, в сложных организационных системах, предлагают работать с рисками изолировано, без учета их взаимного влияния и взаимосвязи их компонентов, а также прибегают к суммированию оценок локальных рисков. В то же время на практике оценка риска системы без учета структуры его компонентов может привести к ошибочной оценке риска в целом и, как следствие, к применению неправильного управляющего воздействия. В связи с этим существует потребность в комплексном подходе к оценке риска организационной системы на основании его структуры. Когда речь идет о взаимосвязях рисков, наиболее перспективным для данной задачи является механизм комплексного оценивания, правила построения которого позволяют манипулировать структурой дерева, учитывая тем самым влияние элементов системы друг на друга и на интегральный риск. Однако стоит отметить, что структуры риска редко представляют собой бинарные деревья, а значит, что при использовании данного механизма могут возникнуть трудности при обосновании выбора пары компонентов для агрегации. В данной работе предлагается обобщенная модификация классического механизма комплексного оценивания для формализации процедуры перехода от структуры декомпозиции риска к бинарному дереву.*

I. Введение

Сложные организационные системы характеризуются большим числом взаимосвязанных рисков и их компонентов, которые могут влиять друг на друга, усиливая или ослабляя общий уровень риска. Существует множество подходов к декомпозиции риска организационной системы в целом, закрепленных в стандартах по управлению рисками [1–2], выделенных в качестве классификаций в учебно-методических материалах [3–4] и научно-исследовательских работах в форме, например, причинно-следственных иерархических структур [5]. На практике структура декомпозиции риска представляет собой некую взаимосвязь его элементов, что требует разработки методов по комплексной оценки риска системы с учетом этой взаимосвязи. При этом, в настоящее время, многие авторы, разрабатывающие методы и алгоритмы для оценки рисков сложных организационных систем не учитывают специфику рассматриваемого параметра (риска) и предлагают оценивать риски системы, как независимые [6–7]. Ряд исследователей, ставящих перед собой задачу по оценке интегрального (общего) риска, прибегают к суммированию оценок локальных рисков [8–9]. Однако игнорирование корреляций между рисками и их компонентами при проведении простого арифметического суммирования может вызвать завышение или занижение оценки интегрального риска. Таким образом, важной задачей при нахождении интегрального риска является учет его структуры.

Одним из методов, который потенциально позволяет учитывать влияние элементов оцениваемой системы друг на друга, является механизм комплексного оценивания (МКО) [10], правила построения которого позволяют манипулировать матрицами сверток и структурой дерева. Механизм был разработан в качестве механизма контроля при управлении организационными системами. Составляющие механизма, а именно, бинарное дерево, матрицы сверток, балльные шкалы задаются экспертами. Однако данный механизм не предполагает формализованного способа идентификации его составляющих, что усложняет работу экспертов.

Исходя из предположения, что менее затруднительной для экспертов может стать процедура декомпозиции риска, чем построение обоснованного бинарного дерева, автором данной работы была предпринята попытка идентификации структуры дерева комплексного оценивания (КО) риска сложной организационной системы на основе экспертно-заданной его иерархической декомпозиции.

II. Постановка задачи и предлагаемый подход к её решению

Пусть у нас есть сложная организационная система, чей интегральный риск представлен в виде иерархической декомпозиции, которую можно изобразить в виде ориентированного графа $G = (V, E)$ ярусно-параллельного типа (рис. 1).

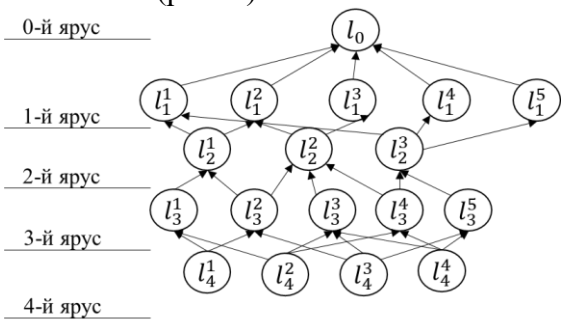


Рис. 1. Ярусно-параллельный тип иерархической декомпозиции интегрального риска сложной организационной системы

Оценки компонентов риска на каждом ярусе декомпозиции получаются в результате агрегирования оценок компонентов следующего яруса. В случае, если компоненты риска могут быть декомпозированы на более чем два подкомпонента, то встает вопрос о порядке их агрегирования на промежуточных ярусах иерархической декомпозиции. В рамках данной работы автором будет предложен метод, позволяющий решить данную задачу. Формально задача заключается в поиске отображения

$$\mathfrak{F}\colon G(V, E) \to G'(V', E'), V \subseteq V', \quad (1)$$

где любая из вершин $v \in V'$ имеет степень исхода либо 2, либо 0. В данной работе не вводится обязательного требования о единичной степени захода для всех вершин, в отличии от классического МКО, где отображение $G'(V', E')$ обязательно должно представлять собой одно бинарное дерево. В связи с отсутствием данного условия, можно говорить о некой модификации классического МКО.

Для решения данной задачи был разработан четырехшаговый алгоритм идентификации графа свертки компонентов риска сложных организационных систем.

Пусть L_i – множества элементов i-го яруса иерархической декомпозиции структура риска.

Шаг 1. Для каждой пары соседних ярусов $(i-1)$, i построим бинарные матрицы B_i и D_i размерностью $\left|2^i\right| \times \left|2^{i-1}\right|$. В клетках матриц, соответствующих смежным вершинам (подмножествам вершин), ставим 1, в остальных – 0. Под смежными подмножествами в случае матриц B_i будем понимать такие $M, N, M \subseteq L_{i-1}, N \subseteq L_i$, что $\forall m \in M\ \forall n \in N\colon (m, n) \in E$, а в случае матриц D_i – такие, что $\forall m \in M\ \exists n \in N\colon (m, n) \in E$, где E – множество ребер задающего иерархию риска графа $G(V, E)$.

Шаг 2. Для матриц B_i, D_i рассчитаем вектор-суммы $\vec{S}(B_i) = (b_i^1, \dots, b_i^{i-1})$, $\vec{S}(D_i) = (d_i^1, \dots, d_i^{i-1})$ где b_i^j, d_i^j – суммы j-го столбца матриц B_i и D_i соответственно.

Шаг 3. Для подмножеств элементов соседних ярусов L_{i-1}, L_i рассчитаем показатели зависимости $\vec{Y}_{i-1} = \frac{\vec{S}(B_i)}{\vec{S}(D_i)}$.

Шаг 4. Для каждой тройки соседних ярусов $(i-2)$, $(i-1)$, i построим иерархическую бинарную структуру с корнями – элементами L_{i-2} по следующему принципу: на текущем шаге агрегируются те пары подмножеств $M^1, M^2\colon M^1, M^2 \subset L_{i-1}, M^1 \cap M^2 = \emptyset$ вершин одного яруса,

соответствующие значения показателя зависимости $\vec{Y}_{i-1}^{1}$ $\vec{Y}_{i-1}^{2}$ которых является максимальным среди всех пар допустимых к агрегации на текущем шаге подмножеств.

Повторение данной процедуры для элементов каждого яруса позволит построить бинарные структуры, позволяющие в итоге найти оценку интегрального риска.

III. Заключение

Предложенная модификация механизма комплексного оценивания рисков сложных организационных систем позволяет обосновано выбирать пары компонентов риска для агрегации. Принцип построения бинарной структуры является формальным и базируется на соотношении числа общих субкомпонентов рассматриваемой пары. Разработанный алгоритм работает в условиях наличия экспертно-заданной иерархической декомпозиции риска.

Стоит отметить, что предложенная модификация не учитывает ситуацию, когда показатели зависимости достигают максимального значения на трех и более несвернутых вершин. Однако в дальнейшем планируется расширять предложенный алгоритм для учета специфики сложной организационной системы с возможностью ввода дополнительных показателей приоритизации.

Тем не менее, процедура идентификации графа свертки компонентов риска сложных организационных систем позволяет обосновано задать порядок свертки компонентов и расширяет классический МКО.

Литература

[1] *ISO Guide 31000:2018(en),* “Risk management - Guidelines”, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ansi.org.

[2] *COSO ERM (2019),* “Управление рисками организации. Интегрированная модель”, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.coso.org.

[3] *Н. В. Кузьминова, Н. В. Моргунова, Н. М. Филимонова,* “Курс лекций по дисциплине «Управление рисками»”, *Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та*, 2007, 76 с.

[4] *П. А. Никаноров,* “Управление рисками в менеджменте качества”, *СПб.: Изд-во Университета при МПА ЕврАзЭС*, 2019, 188 с.

[5] *А. М. Юлгушев,* “Иерархическая классификация предпринимательских рисков”, *Экономика и управление*, 2024, Т 3, №3, С. 394-402.

[6] *В. Н. Бурков, И. В. Буркова, Д. Ю. Адамец,* “Управление рисками на основе качественных оценок”, *Труды 13-й Всероссийской школы-симпозиума, с международным участием Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2019, Симферополь)*, Симферополь, 2019, С. 62-65.

[7] *М. С. Горина,* “Оценка рисков и угроз экономической безопасности предприятия”, *Естественно-гуманитарные исследования*, 2024, №3 (53), С. 113-119.

[8] *В. В. Глухов, В. Н. Войтюк*, “Модель комплексной оценки рисков проекта по созданию промышленных парков”, *π-Economy*, 2023, Т. 16, №.1, С. 114-127.

[9] *J. Chang et al.,* “Multi-disaster integrated risk assessment in city range—a case study of jinan, China”, *International journal of environmental research and public health*, 2023, Vol. 20, №4, 3483 p.

[10] *С. А. Баркалов, Д. А. Новиков, В. И. Новосельцев, Н. А. Половинкина, В. Н. Шипилов,* “Модели управления конфликтами и рисками: [под ред. Д.А. Новиков] ”, *Воронеж: Научная книга*, 2008, 495 с.

Structural and parametric design of memristive biosensors

V. M. Zaripova[1], I. Yu. Petrova[2], D. M. Gimatdinov[1]
[1]MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia,
[2]Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia,
irapet1949@gmail.com, gimatdinov@mirea.ru

Abstract. *This study introduces a systematic approach to the structural and parametric design of memristive biosensors, aiming to enhance key performance metrics including sensitivity, selectivity, detection limit, and long-term stability. The methodology defines criteria for layer compatibility and incorporates an approach to forming datasheets for structural layers of the memristive biosensor, alongside an aggregate scoring algorithm (Score) that evaluates and ranks biosensor architectures based on their operational characteristics. The study presents the results of a synthesis based on datasheets derived from the analysis of more than 40 documented biosensor prototypes. Using the Score algorithm, three optimal configurations were selected for detecting glucose, inflammatory markers, and cancer biomarkers.*

I. Introduction

Memristive biosensors integrate the inherent sensitivity of memristors to resistance changes with the molecular specificity of biorecognition elements, offering compact, energy-efficient, and easily integrable platforms for biomedical diagnostics [1]. Despite these advantages, the absence of a standardized system-level design methodology has resulted in prolonged development timelines and inconsistent reproducibility. We address this gap by proposing a comprehensive framework for selecting materials and designing memristive biosensors based on performance-driven metrics.

Goal: To develop an algorithm that allows selecting the optimal biosensor architecture during the preliminary design stage based on a set of performance metrics.

To achieve this goal, we addressed the following tasks:

- We developed a structural and parametric description of memristive biosensor layers and formalized their requirements. These characteristics were compiled into structured datasheets of corresponding layers.
- We identified a relevant set of performance characteristics and established rules for assessing layer compatibility.
- We implemented a scoring algorithm (Score) based on normalized metrics to compute aggregate performance.
- We experimentally validated the synthesis methodology and proposed optimal biosensor architectures based on the results.

II. Methodology of Structural and Parametric Synthesis of Biosensors

2.1. Layer Datasheets and Synthesis Conditions

We propose a four-layer architecture for the memristive biosensor (Figure 1), comprising an analyte (TA), a biorecognition layer (BRE), an immobilization layer (IM), and a memristive element (MEM). Each layer is described by a structural and parametric datasheet that includes electrical, chemical, mechanical, and biocompatibility parameters [2]. These parameters are categorized into three types: synthesis-related, performance-related, and reference.

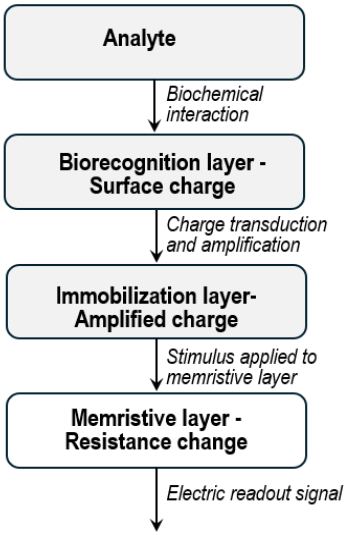


Fig.1. Structural and parametric scheme of the memristive biosensor

We use these datasheets to synthesize feasible layer combinations, evaluate their technological compatibility, and calculate the resulting operational characteristics of the proposed biosensor designs.

We consider a layer combination valid only if it satisfies all five compatibility conditions:

Thermal stability of the analyte

$$max(WT_{BRE}, WT_{IM}, TS_{MEM}) \leq ST_{TA}\,, \tag{1}$$

mperature compatibility

$$max(WT_{BRE}, WT_{IM}, TS_{MEM}) \leq ST_{TA}\,, \tag{2}$$

chanical compatibility

$$|MP_{IM} - MP_{MEM}| \leq \Delta_{\text{доп}}\,, \tag{3}$$

Adhesion and solubility compatibility

$$Adh_{IM}, Sol_{IM} \in additional\ range, \tag{4}$$

pH compatibility

$$PH_{TA} \cap PH_{BRE} \cap PH_{IM} \cap PH_{MEM} \neq \emptyset. \tag{5}$$

If any of these criteria are not met, we exclude the combination from further analysis.

2.2. Algorithm for Memristive Biosensor Architecture Synthesis

We represent each biosensor layer $L \in \{TA, BRE, IM, MEM\}$ as a parameter vector that consolidates all three parameter categories:

$$\boldsymbol{P}_L = \boldsymbol{P}_L^{syn} \cup \boldsymbol{P}_L^{exp} \cup \boldsymbol{P}_L^{info}\,, \tag{6}$$

where $\boldsymbol{P}_L^{syn}$ — parameters used for selection and compatibility or components;

$\boldsymbol{P}_L^{exp}$ — parameters used to calculate performance characteristics;

$\boldsymbol{P}_L^{info}$ — reference properties not directly involved in calculations.

These vectors $\boldsymbol{P}_L$ form the basis for structural and parametric synthesis, layer compatibility evaluation, and selection of optimal solutions.

We carry out the synthesis by identifying effective combinations of the four functional layers (TA, BRE, IM, MEM), each characterized by its parameter vector $\boldsymbol{P}_L$. Our algorithm proceeds in three stages:

1. Generating the space of valid combinations
2. Calculating performance characteristics for each synthesized configuration
3. Selecting optimal configurations

2.3. Calculation of Aggregate Operational Characteristics for synthesized configuration

We assess synthesized architectures based on eight performance indicators: sensitivity, response time, stability, reproducibility, limit of detection (LOD), durability, power consumption, and biocompatibility.

For each valid structure, we calculate aggregated performance metrics using the $\boldsymbol{P}_L^{exp}$-parameters of each layer $L \in \{TA, BRE, IM, MEMMEM\}$. In total, we consider eight performance characteristics $\boldsymbol{P}_L^{exp}$. For each configuration, we compute aggregated metrics based on these characteristics.

To quantitatively evaluate each configuration, we apply an adaptive scoring method that computes an aggregate performance score (Score). Unlike a simple arithmetic mean, this method:

- Accounts for the varying importance of different performance indicators,
- Handles partial data availability gracefully,
- Reduces the influence of incomplete descriptions on the overall score.

The Score is calculated using the following formulation:

$$Score = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \right) \cdot C \quad (7)$$

where: $x_i \in [0,1]$ — normalized value of the i-th metric (e.g., sensitivity, LOD); w_i — weight of the i-th metric; C — data completeness coefficient.

III. Discussion of Results

To validate our methodology, we compiled a dataset of datasheets based on 42 real-world memristive biosensor prototypes. Using these datasheets, we conducted structural and parametric synthesis and applied the Score algorithm to identify high-performing configurations.

Our goal was to design biosensor architectures optimized for glucose detection, meeting compatibility requirements in terms of pH, temperature, and mechanics, while maximizing performance according to the Score. As a result, we identified three biosensor configurations, each demonstrating a distinct balance of feasibility, sensitivity, and reproducibility.

Table 1. Three synthesized memristive biosensor configurations for glucose

№	Конфигурация	BRE	IM	MEM	Score
1	GOx (Penicillium) + Chitosan + PEDOT:HfO_2	GOx from Penicillium	Хитозан	PEDOT:PSS + HfO_2	0.358
2	Aptamer + GPTES + Si-NW	Aptamer (LOD ~100 µM)	GPTES	Si-NW	0.482
3	Enzyme/Aptamer + LbL + PEDOT	Hybrid enzyme/aptamer	LbL с PANI	PEDOT:PSS	0.650

IV. Conclusion

We developed a universal approach to the structural and parametric design of memristive biosensors, integrating a material datasheet database, compatibility criteria, and a comprehensive performance scoring algorithm. The outcomes of this work form the basis for an intelligent design system capable of generating sensor configurations with defined operational characteristics. This methodology is suitable for integration into CAD platforms used in instrumentation engineering.

References

[1]. *I.Tzouvadaki, M. Giovanni, S. Carrara.* (2020). “Memristive Biosensors for Ultrasensitive Diagnostics and Therapeutics”, In book: Applications of Emerging Memory Technology 2020, pp.133-157, DOI: 10.1007/978-981-13-8379-3_5.

[2]. *Z. Viktoriya, P. Irina, L. Yuliya and G. Damir*, "Structural Design of Memristive Biosensors," *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCT62929.2024.10874946.

Исследование возможности снижения размерности задачи нахождения критических вершин в графе

А. А. Крыгин, С. М. Тарасова
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

andreyakr@yandex.ru, tarasova_sofia_m@mail.ru

Аннотация. *В работе рассматривается задача поиска критических вершин инженерной сети — таких узлов, удаление которых наносит максимальный ущерб структуре сети, измеряемый через количество связных пар вершин. Традиционно она решается путём сведения задачи к эквивалентной задаче линейного программирования, однако в таком случае ее высокая размерность приводит к значительной вычислительной сложности. Для уменьшения размерности предлагается предварительный классификация некоторых вершин на критические и некритические с помощью анализа их графовых характеристик. Это позволяет ввести дополнительные ограничения в задачу линейного программирования, что снижает её размерность и ускоряет поиск решение. В результате определены оптимальные характеристики для классификации: «коэффициент близости» для критических вершин и «промежуточная центральность» для некритических вершин.*

I. Введение

Критические вершины сети – подмножество вершин заданной мощности, при удалении которых сети будет нанесен максимальный ущерб. То есть, если заданы связный, неориентированный граф без петель и кратных ребер $G(V,E), |V| = n, |E| = m$, количество удаляемых вершин q и мера ущерба $D(G)$: $G \to \mathbb{R}$. Обозначим W — подмножество $V, |W| \leqslant q$ и G_W — подграф графа G, получившийся путем удаления вершин подмножества W и инцидентных им ребер. Тогда требуется найти такое подмножество $\mathrm{W}' : \max_{\mathrm{W}'} \mathrm{D}(G_{W'})$ или $\mathrm{W}' : \min_{\mathrm{W}'} \mathrm{D}(G_{W'})$, в зависимости от функции $D(G)$ [2]. В такой постановке мера ущерба, как правило, опирается на количество связных пар вершин. Поиск точного решения осуществляется путем сведения задачи к эквивалентной задаче линейного программирования [3].

$$\min \sum_{i,j \in V} u_{i,j}$$

$$u_{i,j} + v_i + v_j \geq 1, \forall (i,j) \in E$$

$$u_{i,j} + u_{j,w} - u_{w,i} \leq 1, \forall (i,j,w) \in V$$

$$u_{i,j} - u_{j,w} + u_{w,i} \leq 1, \forall (i,j,w) \in V$$

$$-u_{i,j} + u_{j,w} + u_{w,i} \leq 1, \forall (i,j,w) \in V$$

$$\sum_{i \in V} v_i \leq q,$$

где $u_{i,j}$ – переменная, показывающая связаны ли вершины i и j. $u_{i,j} = 0$, если вершины i и j не связаны, $u_{i,j} = 1$, если вершины i и j связаны;

v_i – переменная, показывающая будет ли вершина i в оптимальном решении удалена из графа. $v_i = 0$, если вершина i не удаляется из графа, $v_i = 1$, если вершина i удаляется из графа.

Из-за большой размерности задачи, решение имеет высокую вычислительную сложность. Поэтому предлагается уменьшить размерность с помощью добавления ограничений вида $v_i = 0$ или $v_i = 1$. В таком случае, необходимо определить две характеристики, значения которых

позволят заранее отнести вершину к подмножеству критических или наоборот, к подмножеству некритических узлов.

II. Основная часть

Для точной постановки задачи пришлось решить ряд подзадач [1], таких как:

- Определение класса графов, для которых проводится исследование;
- Определение количества критических вершин q;
- Оценка доли решений;
- Оценка мощности подмножеств вершин, которые почти всегда являются критическими или почти всегда являются некритическими;
- Разработка оптимального алгоритма подбора характеристик;
- Подбор оптимальной пары характеристик.

Поскольку нет гарантии, что оптимальная пара характеристик будет одинаковой для графов различных типов инженерных сетей, необходимо определить конкретный класс графов, для которых будет проводиться исследование. Будем считать, что в графе есть теоретическая возможность снизить размерность задачи ЛП, если существуют вершины, которые почти всегда являются критическими, и вершины, которые почти никогда не являются критическими. То есть вершины, относительная частота появления в решениях которых близка к 0 или 1. В качестве исследуемого класса графов рассматривалось порядка 20 графов магистральных электрических сетей государств СНГ с количеством узлов 30–60.

Так как оптимальная пара характеристик может меняться в зависимости от различных диапазонов значений q, при которых решается задача ЛП, необходимо было выбрать конкретный диапазон. После рассмотрения различных государственных программ, было установлено, что достаточно ограничиться рассмотрением наборов критических вершин, количество которых не превышает одной пятой от общего числа вершин.

Задачу ЛП, полученную в результате добавления ограничений к исходной задаче ЛП, будем называть сокращенной. В таком случае некоторые решения исходной задачи не будут найдены. Долей решений будем называть отношение количества найденных решений в сокращённой задаче линейного программирования к количеству решений в исходной задаче. Было определено, что допустимо сокращать размерность задачи до тех пор, пока количество найденных решений в сокращённой задаче превышает половину всех решений исходной задачи. В таком случае гарантируется, что если одновременно будут повреждены q_0 узлов, то эти узлы не будут являться решением задачи линейного программирования.

Обозначим за $A, |A| = a$ подмножество вершин, которые почти всегда являются критическими, а за $B, |B| = b$ подмножество вершин, которые почти всегда являются некритическими. Были найдены следующие ограничения: мощность подмножества вершин, которые почти всегда являются критическими не превышает величину $a = q - 2\lfloor q/4 \rfloor - 1$; мощность подмножества вершин, которые почти всегда являются некритическими не превышает величину $b = n - q$.

Предположим, что для заданного графа и параметра q есть две пары характеристик. Необходимо было определить с помощью какой пары сокращенная задача ЛП будет решена быстрее. Оказалось, что количество переменных и ограничений в задаче линейного программирования при добавлении ограничений вида $v_i = 1$ сокращаются больше, чем при добавлении ограничений вида $v_i = 0$. Поэтому стоит выбрать ту пару характеристик, в результате применения которой будет добавлено больше ограничений для вершин, почти всегда являющихся критическими.

Для поиска критических вершин была выбрана характеристика «коэффициент близости», а для некритических вершин — «промежуточная центральность».

III. Заключение

В этой работе определен класс графов, для которых теоретически доказана возможность существования оптимальных характеристик; определено количество критических вершин $q = n/5$, где n — мощность множества вершин в графе; получена оценка для доли решений, равная

0.5; разработан оптимальный алгоритм подбора характеристик и найдена оптимальная пара характеристик: «коэффициент близости» и «промежуточная центральность».

Литература

[1] *А. А. Крыгин, С. М. Тарасова*, “Снижение размерности задачи нахождения критических узлов сети”, *УБС, 111 (2024), 118–146*

[2] *Dinh T.N., Xuan Y., Thai M.T. et al.* On New Approaches of Assessing Network Vulnerability: Hardness and Approximation // *IEEE ACM Trans. on Networking. – 2012. – Vol. 20(2). – Pp. 609–619.*

[3] *Shen Y., Nguyen N.P., Xuan Y. et al.* On the Discovery of Critical Links and Nodes for Assessing Network Vulnerability //*IEEE/ACM Trans. on Networking.*

Нейросетевой анализ визуальных данных подводной инфраструктуры в информационно-измерительной системе мониторинга

Г. К. Тевяшов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
glebtevyashov96@yandex.ru

***Аннотация**. В настоящее время использование киберфизических систем способствует эффективному развитию аквакультуры и контролю водных ресурсов. Такие системы способны обеспечивать оперативный и полный мониторинг состояния самой среды, отслеживание поведения и размеров различных гидробионтов, а также состояние подводной инфраструктуры. Особое значение в этом контексте имеют трубопроводные коммуникации, которые при наличии дефектов или иных неисправностей могут влиять на состояние водной среды. В работе предлагается подход к распознаванию подводных труб и определению их ориентации на видеопотоке с использованием сегментирующей нейросети YOLO и анализа геометрических характеристик сегмента методом главных компонент. Система реализована на встраиваемом вычислительном модуле Jetson Nano и обеспечивает обработку данных в реальном времени. Алгоритм демонстрирует устойчивость к перспективным и масштабным искажениям, возникающим в условиях съёмки с переменной глубины, а также корректно определяет продольную ось объекта даже при его наклоне и изгибах. Предложенное решение обеспечивает ориентирование подводного аппарата вдоль трубопровода, облегчая навигацию и автоматизируя процессы инспекции инженерных коммуникаций в акваториях рыбоводческих хозяйств и других водных объектов.*

I. Введение

Различные виды производств проходят этап цифровизации, в том числе и в аквакультуре внедряются киберфизические системы. Для эффективного использования водных ресурсов требуется использовать системы наблюдения за состояниями водной среды, гидробионтов и технической инфраструктуры. Нарушения в работе или же наличие дефектов в трубопроводных коммуникациях могут приводить к ухудшению качества воды, стрессу у гидробионтов и значительным экономическим потерям. В связи с этим возникает необходимость разработки автономных средств визуального мониторинга, способных функционировать в реальном времени и предоставлять достоверную информацию о состоянии протяжённых объектов в труднодоступной подводной среде.

Особую сложность представляет задача ориентирования подводного аппарата вдоль труб, имеющих произвольное положение в пространстве, а именно изгибы, наклоны и переменную видимую ширину, обусловленную эффектами перспективы и изменением глубины съёмки. Традиционные методы, основанные на геометрическом анализе изображения, демонстрируют низкую устойчивость к таким искажениям, особенно при слабом освещении и наличии шумов. В этих условиях особенно перспективными являются подходы, основанные на применении нейросетевых моделей, способных выделять целевые объекты на изображении с учётом контекста и вариативности формы.

II. Методика работы

Целевым объектом обработки является труба, занимающая значительную часть изображения и обладающая характерной вытянутой формой. В прошлых исследованиях была продемонстрирована работа нейросетевого алгоритма по распознаванию таких протяженных объектов (Рис. 1).

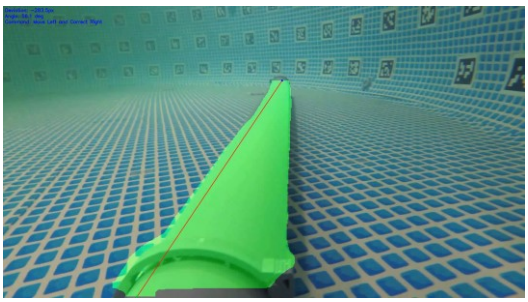


Рис.1. Пример распознавания протяженных объектов

Для обнаружения используется нейросетевая архитектура *YOLOv9* с модулем сегментации, способная выделять маску объекта на изображении с высокой устойчивостью к шумам и визуальным артефактам. Для обучения модели был подготовлен датасет, сформированный из видеопотока, полученного с аналоговой камеры. Оцифровка сигнала осуществлялась с помощью внешнего адаптера, после чего видеоряд разбивался на последовательности кадров. Аннотация данных проводилась в полуавтоматическом режиме, включающем генерацию предварительных масок с последующей ручной корректировкой. Разметка производилась в формате *COCO-segmentation* с последующей адаптацией к требованиям *YOLOv9*.

Обучение нейросетевой модели осуществлялось на стационарной вычислительной платформе с *GPU*-ускорением. После завершения тренировки веса модели были экспортированы в оптимизированном формате для запуска на борту встраиваемой системы *NVIDIA Jetson Nano*. Благодаря высокой энергоэффективности и аппаратной поддержке инференса, полученная реализация обеспечивает обработку кадров в реальном времени.

После прохождения изображения через нейросетевую модель формируется бинарная маска $M(x, y)$, содержащая информацию о контуре трубы. Для определения продольной оси объекта из маски извлекается множество пикселей $P = \{(x_i, y_i)\}$, соответствующих выделенному сегменту. Первым шагом является вычисление центра масс (среднего положения всех точек объекта):

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i,\ \bar{y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i, \tag{1}$$

где N – общее число пикселей, включенных в маску.

Затем строится ковариационная матрица распределения координат:

$$C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} x_i - \bar{x} \\ y_i - \bar{y} \end{bmatrix} [x_i - \bar{x} \quad y_i - \bar{y}] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Собственные векторы матрицы C отражают основные направления распространения пикселей: главный собственный вектор указывает направление вытянутости объекта. Угол ориентации трубы относительно горизонтали определяется по выражению:

$$\theta = \arctan 2\left(v_y, v_x\right) \tag{3}$$

где (v_y, v_x) – компоненты ведущего собственного вектора.

III. Заключение

Такой подход позволяет корректно определять ориентацию даже при наличии изгибов, сужений и локальных поворотов трубы в пределах кадра. В случае резких изгибов метод может быть дополнен локальной аппроксимацией или скелетизацией маски, однако в рамках данной реализации выбран усреднённый вектор как надёжный критерий навигационного выравнивания.

Алгоритм устойчив к изменению масштаба изображения, вызванному колебаниями глубины, и не требует априорной информации о высоте камеры или параметрах объектива, что позволит применять его в условиях реальной подводной съёмки без предварительной калибровки. Полученное направление передаётся в управляющую подсистему подводного аппарата для корректировки курса движения вдоль трассы трубопровода, что позволяет реализовать адаптивное визуальное сопровождение объектов инженерной инфраструктуры водоёмов.

Литература

[1] *Г.К. Тевяшов,* “Распознавание объектов в задачах навигации подводного аппарата с использованием системы технического зрения” *Сборник тезисов 35-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная Робототехника»*, 2024, сс. 149-150.

[2] *Ю. А. Рыльцева*, "Современные способы и средства диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов" *Вестник МГСУ*, 16(9), 2021, сс. 1236-1263.

[3*] А. Л. Суздалева, В. Н. Безносов, М. А. Кучкина*, “Экология как область практической деятельности” *Вестник Московского энергетического института. Вестник* МЭИ, № 4, 2006, сс. 74-85.

[4] *C. Sun, G. Cembrano, V. Puig and J. Meseguer,* "Cyber-Physical Systems for Real-Time Management in the Urban Water Cycle," *2018 International Workshop on Cyber-physical Systems for Smart Water Networks (CySWater)*, Porto, Portugal, 2018, pp. 5-8, doi: 10.1109/CySWater.2018.00008.

Современные методы адаптивного управления в автоматизированных системах

Л. П. Скрипко[1], А. А. Скрипко[2]

[1]Каспийский институт морского и речного транспорта им. генерал-адмирала Ф.М. Апраксина (филиал) Волжского государственного университета водного транспорта им. адмирала М.П. Лазарева, г. Астрахань, Россия,

[2]Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия,

skripkoanastasia@mail.ru

***Аннотация**. Адаптивные системы управления представляют собой интеллектуальные системы, способные изменять свое поведение в ответ на изменения в окружающей среде или в управляемом объекте. Ключевое отличие от традиционных систем управления заключается в способности к самонастройке и автоматической корректировке параметров для достижения наилучших показателей в динамически изменяющихся условиях. Это достигается за счет использования специальных алгоритмов, которые анализируют входные данные, оценивают состояние системы и вырабатывают оптимальные управляющие воздействия. Такой подход позволяет повысить эффективность и надежность работы управляемых объектов, обеспечивая стабильность и точность даже при наличии значительных возмущений и неточностей в модели. Разработка и внедрение адаптивных систем управления являются актуальной задачей в различных областях, требующих высокой степени автоматизации и адаптации к изменяющимся условиям.*

I. Введение

Современные системы автоматизации технологическими процессами в большинстве случаев строятся на базе промышленных микропроцессорных контроллеров. Это позволяет повышать качество управления, а также возможностью изменения в процессе работы параметров настройки регуляторов и самого закона управления. Применение регуляторов и корректирующих устройств необходимы для достижения требуемых показателей качества.

Существенной практической проблемой автоматического управления является нестационарность параметров объекта управления. В условиях, когда происходит изменение свойств управляемого объекта. Начальные настройки регуляторов не обеспечивают требуемого качества, а в некоторых случаях и устойчивости систем управления.

Большую чувствительность по устойчивости и качеству автоматизированных систем управления (АСУ) к изменению свойств объекта управления осуществляется регулятором. В таких случаях применяются адаптивные системы управления.

В настоящее время проблем адаптивного управления уделяется большое внимание. Отечественные приборостроительные предприятия выпускают свободно контролируемые контроллеры, и они имеют достаточно невысокую стоимость.

Второй причиной, использование адаптивной системы управления – это их интеллектуальность на основе математических моделей на использование нечеткой логики, нейронных сетей, синергетики, применение которых улучшает качество управления нестационарными параметрами при наличии соответствующих законов.

Построение адаптивных систем являются вполне оправданным при применении микропроцессорных контроллеров с использованием отлаженных алгоритмов. Процесс синтеза адаптивного управления упрощается, если в момент включения известны все требуемые изменения параметров или они определяются в процессе работы, а также регулятор обеспечивает точность и эффективность поддержание нужного режима. Применение нечеткой логики и нейронных сетей позволяет предать регуляторам новые свойства и расширение диапазона воздействия увеличивает запас устойчивости и амплитуды.

В этой связи перспективным методом разработки адаптивных систем управления линейными нестационарными системами является метод, основанный на применении неизменного воздействия.

Предметом исследования данной работы является разработка методов и алгоритмов управления, основанных на адаптивных линейных корректирующих устройств для объекта с нестационарными параметрами. Для этого следует разработать алгоритмы, обеспечивающие адаптивное управление и их программная реализация на базе промышленных микропроцессорных контроллеров.

II. Научная новизна

Применение адаптивного управления, основанного на использовании адаптивного корректирующего устройства и регулятора с неизменяемыми в процессе работы параметрами и поддержание запаса устойчивости и требуемого качества. Область применения систем управления может быть достаточно широкой. Такие задачи возникают при управлении электромеханическими системами; преобразователями напряжения; при управлении замкнутым водоснабжением; при управлении «умными» теплицами и т.д.

В данной работе используется метод адаптивного управления на примере перекачивании и транспортировке нефтепродуктов (мазут, сера) на нефтедобывающих заводах и управлении замкнутым водоснабжением, для решения реальных задач на рыболовных фермах и в тепличных хозяйствах.

При работе автоматизированных перекачиваемых насосом комплексов характеризуется изменяющимися параметрами в комплексе. Например, при транспортировке нефтепродуктов по трубопроводу происходит большие колебания параметров перекачиваемой жидкости; сопротивление насоса и трубопровода. При подходе к автоматизированному регулированию необходимо поставить и решить вопросы для повышения эффективности обработки параметрических возмущений.

Для увеличения времени использования и уменьшения изнашиваемости приборов и оборудования необходимо учитывать негативные факторы, оказывающие возмущающие воздействия. Учитывая, что адаптивное управление линейными нестационарными системами в условиях неизменных возмущений необходимы в различных областях газоперерабатывающей промышленности, выделим негативные факторы влияющие на бесперебойность работы системы при транспортировке нефтепродуктов. В рассматриваемую систему входят: насосы, трубопровод, стыковочные швы, обмотка для индукционного разогрева, щит для подключения тока.

Одним из негативных факторов влияющих на комплекс насосов является: напор; расход; параметрические возмущения, такие как гидравлическое сопротивление сети; сопротивление насоса.

III. Математическая модель

Для создания математической модели необходимо ввести все необходимые параметры, которые участвуют в данном процессе. При этом рассматривая все физические процессы, фазовые переходы.

Уравнение сохранения массы при транспортировке можно записать в виде деформационного уравнения:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} p \cdot v = J \tag{1}$$

Где:

t – время; x – координата; v – скорость движения жидкости; J – интенсивность движения жидкости.

Уравнение неразрывности струи имеют вид:

$$(v_1 s_1 = v_2 s_2) \tag{2}$$

При подаче мазута по трубопроводу отпадает необходимость в приемно-сливных устройствах, не происходит обводнение мазута, связанного с его разогревом при сливе,

сокращается обслуживающий персонал, уменьшается потребный запас топлива, снижаются расходы электроэнергии и тепла на собственные нужды, повышается износ оборудования.

Зададим следующие параметры. Пусть R_c – сопротивление сети; P_c – напор гидравлической сети; dQ – расход жидкости в системе. Тогда:

$$R_c = \frac{dP_c}{dQ}|_{Q_0} > 0 \quad (3)$$

Если $R_{\text{цм}}$ – сопротивление центробежного насоса; $dP_{\text{цм}}$ – напор насоса, следовательно

$$R_{\text{цм}} = \frac{dP_{\text{цм}}}{dQ}|_{Q_0} < 0 \quad (4)$$

Рассмотрим модель насосного комплекса, построенного на основе метода электроаналогии, схема которого изображена на рис.1.

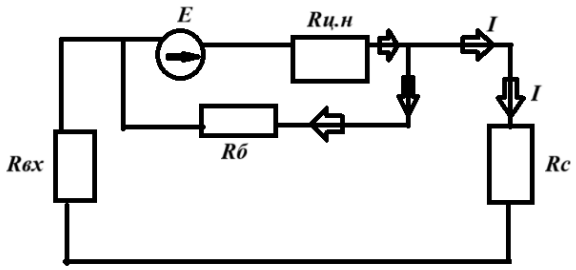


Рис.1. Схема модели насосного комплекса, построенного на основе метода электроаналогии

Где Е – электрический эквивалент напора; $R_{\text{вх}}$ – эквивалент сопротивления входного трубопровода; $R_{\text{б}}$ – сопротивление байпаса с регулировкой.

В соответствии со вторым правилом Кирхгофа для электрической цепи

$$E(j\omega) = I(j\omega)\left[R_{\text{цм}} + \frac{R_{\text{б}} \cdot (R_{\text{ах}} + R_{\text{с}})}{R_{\text{б}} + R_{\text{ах}} + R_{\text{с}}}\right] \quad (5)$$

$$\frac{1}{R^n} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R_{\text{б}}} = \frac{R_{\text{б}} + R'}{R_{\text{б}} \cdot R'} = \frac{R_{\text{б}} + (R_{\text{с}} + R_{\text{вх}})}{(R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}) \cdot R_{\text{б}}}$$

$$R'' = \frac{(R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}) \cdot R_{\text{б}}}{R_{\text{б}} + R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}}$$

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{цн}} + R'' = R_{\text{цн}} + \frac{(R_{\text{с}} + R_{\text{вх}})}{R_{\text{б}} + R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}}$$

Напряжение согласно закону Ома для участка цепи

$$\text{U} = \text{J} \cdot R_{\text{б}}$$

$$\text{U} = \text{J}\left[R_{\text{цн}} + \frac{(R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}) \cdot R_{\text{б}}}{R_{\text{б}} + R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}}\right]$$

Параметрические возмущения могут привести к серьезным последствиям, включая снижение производительности и возникновение кавитации, что негативно сказывается на долговечности системы.

Работа автоматизированных насосных систем с учетом этих факторов требует применения адаптивных самонастраивающихся систем управления, которые эффективно обрабатывают параметрические возмущения, обеспечивая бесперебойную работу. Выбор подходящих насосов и использование методов автоматического управления на основе математических моделей позволяют значительно улучшить эксплуатационные характеристики, минимизировать износ и повысить надежность работы систем транспортировки.

IV. Заключение

В заключении отметим, что разработанный метод имеет значительный потенциал для применения в различных отраслях техники и промышленности, где требуется высокая степень точности и надежности управления. Возможность адаптации под конкретные условия работы, интеграция с существующими системами управления и наблюдения, а также высокие показатели эффективности делают предложенный подход перспективным решением для задач анализа и синтеза управляемых динамических систем. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию вычислительных алгоритмов и расширение области применения предложенной методологии.

Создание и развитие адаптивных систем управления с учетом условий эксплуатации, параметрических изменений и специфики перекачиваемых жидкостей являются необходимыми условиями для повышения эффективности и надежности современного оборудования в газоперерабатывающей и других отраслях.

Литература

[1] *L. Skripko and A. Skripko*, "Improving in the Quality and Energy Efficiency in the Transportation of Hydrocarbon Materials*," 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICCT62929.2024.10874955.

[2] *Лютов Алексей Германович, Новоженин Максим Борисович* Адаптивное беспоисковое управление насосным комплексом в условиях нестационарности // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2023. №4. URL: *https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-bespoiskovoe-upravlenie-nasosnym-kompleksom-v-usloviyah-nestatsionarnosti*

[3] Математическое описание и исследование линейных нестационарных систем : Учеб. пособие по курсу "Теория автомат. регулирования" / *В. В. Солодовников, В. Г. Коньков; Под ред. В. В. Солодовникова*. - Москва : МВТУ, 1982. - 82 с. : ил.; 20 см.

Моделирование передачи управляющего сигнала в скоплениях биологических объектов

Д. В. Железняков, Ю. А. Головко, А. М. Лихтер
Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, г. Астрахань, Россия,
dv.zheleznyakov@yandex.ru

***Аннотация**. Статья посвящена моделированию процесса передачи информации скоплению объектов управления в мультимодальных системах. Вводится критерий оптимальности проектирования указанных систем, основанный на максимизации функции пропускной способности каналов передачи информации скоплению. Показан пример влияния времени запаздывания воздействия одного из управляющих сигналов, приводящий к изменению начального объема скопления в процессе его движения и, как следствие, изменению количества передаваемой ему информации. Рассмотрен практически важный случай анализа процесса передачи бимодального сигнала (света и звука) гидробионтам.*

I. Введение

Современные задачи управления биологическими объектами требуют разработки эффективных систем, учитывающих сложные взаимодействия между источниками, средой передачи сигналов и объектами управления. Проводимые ранее исследования демонстрируют перспективность использования мультимодальных сигналов, имитирующих биологические, для повышения эффективности управления [1]. В данной статье предлагается обобщённая модель системы управления, включающая источники сигналов разной модальности, каналы передачи информации и скопления объектов управления с различными сенсорами.

II. Основная часть

Пусть скопление состоит из N объектов (гидробионтов или насекомых с различными сенсорами), каждый из которых имеет координаты $r_i(0) = (x_i,y_i,z_i)$ в трехмерном пространстве, где $i = 1,2,...N$. Плотность скопления ρ определяется как количество объектов в единице объема:

$$\rho = \frac{N}{V} \tag{1}$$

где V — объем области, занимаемой скоплением. Скопления имеют определенную форму, задающую начальные координаты отдельных объектов. Форма может быть шаровой, эллипсоидной или другой, что влияет на распределение объектов в пространстве. Например, для шаровой формы координаты объектов можно задать с помощью сферических координат [2]:

$$x_i = r \sin\theta_i \cos\phi_i$$
$$y_i = r \sin\theta_i \sin\phi_i$$
$$x_i = r \cos\theta_i$$

где r — радиус сферы, ϑ_i — полярный угол, ϕ_i — азимутальный угол.

При распространении сигнала через скопление происходит его ослабление и искажение [3]. Коэффициент пропускания сигнала скоплением $T(r)$ зависит от плотности скопления и пути, пройденного сигналом внутри скопления:

$$T(r) = e^{-\int_{L(r)} \mu\rho(r'),dl} \tag{2}$$

где μ — коэффициент ослабления сигнала в единице плотности, $L(r)$ — траектория сигнала от источника до точки r, ρ(r') — плотность скопления вдоль траектории, dl — дифференциал длины вдоль траектории.

Интенсивность сигнала в точке r определяется как [4]:

$$S(r,t) = S_0\big(t - \tau(r)\big) \cdot T(r), \tag{3}$$

где $S_0(t)$ — исходная интенсивность сигнала во времени, $\tau(r)$ — время распространения сигнала до точки r, T(r) — коэффициент пропускания скопления.

Время запаздывания сигнала по отношению к отдельному объекту, входящему в состав скопления, рассчитывается как [5]:

$$\tau(r) = \frac{|r - r_s|}{v_s}, \quad (4)$$

где $\tau(r)$ — координаты источника сигнала, v_s — скорость распространения сигнала.

Из-за ослабления и запаздывания сигнала объекты, находящиеся ближе к источнику, получают информацию раньше и с большей интенсивностью, чем удаленные периферийные объекты и объекты, находящиеся на траектории сигнала внутри скопления. Это приводит к тому, что периферийные объекты, находящиеся ближе к источнику сигнала, получают управляющую информацию первыми, и, соответственно, раньше демонстрируют реакцию на полученную информацию [6].

Положение каждого объекта изменяется во времени в соответствии с получаемой информацией:

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i = f\big(P(r_i, t)\big) \cdot n_i, \quad (5)$$

где v_i — вектор скорости объекта, $f(P)$ — функция отклика на интенсивность сигнала, n_i — единичный вектор направления вдоль направления r_i к источнику сигнала.

Поскольку объекты могут начинать двигаться с разными скоростями и в разное время, форма скопления начинает деформироваться. Ближайшие к источнику информации объекты приближаются к нему раньше, что приводит к вытягиванию скопления в его направлении. [7]

Рассмотрим ситуацию, когда на скопление воздействуют одновременно звуковым и световым сигналами:

- Скорость света с ≈ 3 * 10^8 м/с значительно превосходит скорость звука в воде v_{sound} ≈ 1500 м/с. [8]
- Световой сигнал достигает всех объектов практически мгновенно $\tau_{light} \approx 0$, тогда как звуковой сигнал приходит с существенным запаздыванием.

В результате объекты реагируют на световой сигнал одновременно, а на звуковой — с запаздыванием, зависящим от их расстояния до источника. Это усиливает деформацию скопления и может использоваться для управления его формой [9].

Суммарное количество информации, получаемое всеми объектами в момент времени t, определяется интегрированием по всему объему скопления:

$$P_{total}(t) = \sum_{i=1}^{N} P(r_i, t) = \int_V P(r, t)\rho(r, t)dV, \quad (6)$$

В данном выражении $\rho(r,t)$ учитывает изменение плотности скопления во времени из-за движения объектов.

Так как плотность скопления не одинакова в объеме скопления, для расчета можно разбить его на участки, установив их размер исходя из среднего размера объекта управления в скоплении (например, для кильки, 10 см) [10]. Пример разбивки представлен на рисунке 1.

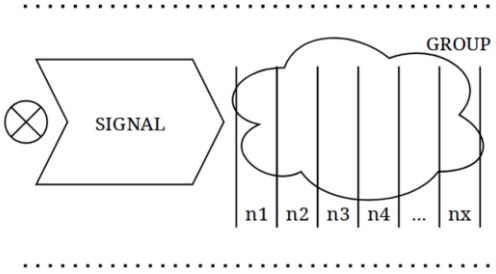


Рис.1. Схема разделения скопления

В этом случае при движении объекта управления к источнику информации будет происходить переход объектов из одного участка в другой.

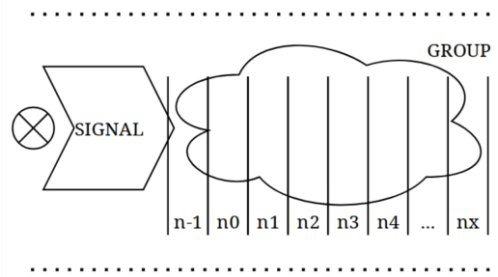


Рис.2. Схема разделения измененного скопления

Соответственно, при разбивании скопления на сектора, расчет количества получаемой объектами информации будет производится по формуле.

$$P_{total}(t) = \sum_{i=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} P(r_i, t) = \int_M \int_V P(r,t)\rho(r,t)dVdM, \quad (7)$$

где N – количество объектов в секторе, M – количество секторов.

Далее в работе будет рассматриваться пример расчета изменения формы скопления и количества получаемой биологическими объектами информации.

III. Заключение

Форма и размер скопления влияют на распределение интенсивности сигнала внутри него. Так для компактных форм (например, шарообразной, принимаемой для защиты от хищников) характерно «статичное состояние», более высокая плотность, распределение плотности более равномерно. В центре такого скопления сигнал значительно ослабляется, что снижает суммарную информацию.

Для вытянутых форм, например находящихся в процессе движения к источнику информации или от него, увеличивается количество переферийных объектов, плотность распределяется менее равномерно, а ослабление сигнала менее выражено, что увеличивает количество информации, получаемой объектами.

Литература

[1] Лихтер, А.М. Моделирование систем управления процессами лова рыбы: монография/ А.М. Лихтер. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2006. – 315с.

[2] Zhang Y, Lauder GV. Energy conservation by collective movement in schooling fish. Elife. 2024 Feb 20;12:RP90352. doi: 10.7554/eLife.90352. PMID: 38375853; PMCID: PMC10942612.

[3] Applied Underwater Acoustics : Absorption of Sound in Seawater / eds: Thomas H. Neighbors, David Bradley, Elsevier, 2017. P. 273-295. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7

[4] Computational Ocean Acoustics / Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Springer New York, NY, 2011. 794 p.

[5] J. Wei, Y. Wang, C. Gong and N. Huang, "Noise Analysis and Modulation Optimization for Nonlinear Visible Light Communication System With Signal-Dependent Noise," in IEEE Photonics Journal, vol. 15, no. 6, pp. 1-11, Dec. 2023, Art no. 7304511, doi: 10.1109/JPHOT.2023.3323139.

[6] Jun-Hong Cui, Jiejun Kong, M. Gerla and Shengli Zhou, "The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications," in _IEEE Network_, vol. 20, no. 3, pp. 12-18, May-June 2006, doi: 10.1109/MNET.2006.1637927.

[7] Курейчик Владимир Викторвич, Родзин Сергей Иванович МОДЕЛЬ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ РОЯ САРАНЧИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ МУЛЬТИЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2023. №1 (217). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/model-kollaborativnogo-povedeniya-roya-saranchi-dlya-optimizatsii-mnogomernyh-multiekstremalnyh-funktsiy (дата обращения: 15.05.2025).

[8] Бабий В. И., Бабий М. В., Родионов А. А. Перспективный оптико-акустический метод измерения параметров термодинамического состояния морской среды. Оценка погрешностей // Морской гидрофизический журнал. 2016. №2 (188). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnyy-optiko-akusticheskiy-metod-izmereniya-parametrov-termodinamicheskogo-sostoyaniya-morskoy-sredy-otsenka-pogreshnostey (дата обращения: 15.05.2025).

[9] Topaz CM, D'Orsogna MR, Edelstein-Keshet L, Bernoff AJ. Locust dynamics: behavioral phase change and swarming. PLoS Comput Biol. 2012;8(8):e1002642. doi: 10.1371/journal.pcbi.1002642. Epub 2012 Aug 16. PMID: 22916003; PMCID: PMC3420939.

[10] Устарбекова Джамиля Анварбековна Некоторые особенности биологии анчоусовидной кильки Clupeonella engrauliformis (Borodin, 1904) Каспийского моря // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2014. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-osobennosti-biologii-anchousovidnoy-kilki-clupeonella-engrauliformis-borodin-1904-kaspiyskogo-morya (дата обращения: 15.05.2025).

Разработка микроструйного устройства синхронизации на основе 4-разрядного счетчика в интегральном исполнении

Л. Ю. Дуда
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
liya.duda0@gmail.com

Аннотация. *Представлены результаты разработки устройства синхронизации, принципиальные схемы 4-разрядного счетчика, созданного на основе счетного триггера, а также экспериментального стенда для исследования передаточных характеристик с использованием семикаскадного тактового генератора. Приведены 3D-модели микроструйных элементов, описаны принципы работы устройств.*

I. Введение

Микроструйные устройства дискретной микрофлюидики представляют собой ключевые компоненты для создания устойчивых к внешним воздействиям систем управления. Их работа основана на принципах логического управления, что исключает зависимость от временных параметров и повышает надежность в условиях электромагнитных и радиационных излучений, экстремальных температур. При этом взаимодействие с электронными каналами управления осуществляется при помощи пневмоэлектрических преобразователей [1, 2]. Одними из ключевых компонентов микроструйных систем управления являются устройства синхронизации, при помощи которых обеспечивается возможность выполнения операций алгоритмов управления в заданные моменты времени. Такие устройства находят применение в особо важных областях, включая авиацию, космическую технику и робототехнику, где требуются высокая устойчивость и точность. В данной работе рассматривается разработка микроструйного устройства синхронизации на основе 4-разрядного счетчика в интегральном исполнении, который состоит из каскадно соединенных усовершенствованных микроструйных счетных триггеров [3]. Элементы выполнены в интегральном исполнении, что обеспечивает их технологичность и эффективность.

II. Разработка принципиальной схемы устройства синхронизации

Разработана принципиальная схема микроструйного устройства синхронизации (рис.1), включающая семикаскадный микроструйный генератор и два счетных триггера, делящих частоту пополам. При подаче питания струя занимает одно из положений. Из-за конструктивной асимметрии элементов триггер Т3 срабатывает быстрее остальных, так как обладает более мощной струёй, следовательно его положение определяет состояние других элементов.

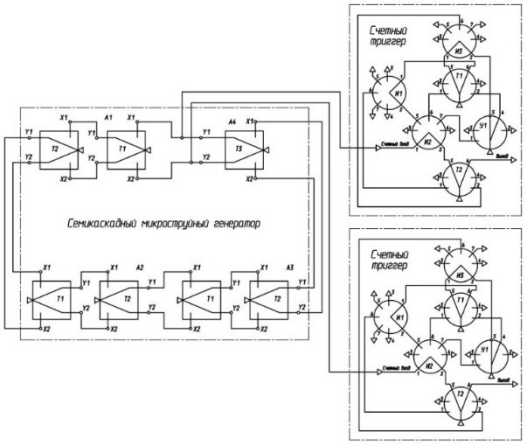


Рис. 1. Принципиальная схема микроструйного устройства синхронизации

III. Описание модели усовершенствованного микроструйного счетного триггера

Для повышения надежности работы счетного триггера была улучшена конструкция входящего в его состав реле. В схему реле добавлены элементы ИЛИ, выполняющие функцию

гашения обратных волн давления. Это предотвращает распространение возмущений в переключающий элемент, обеспечивая стабильность работы устройства. Дополнительно была уменьшена емкость коммутационных каналов, что позволило снизить потери давления и повысить эффективность передачи сигналов. На основе оптимизированной конструкции разработана 3D-модель счетного триггера (рис.2), учитывающая все внесенные изменения.

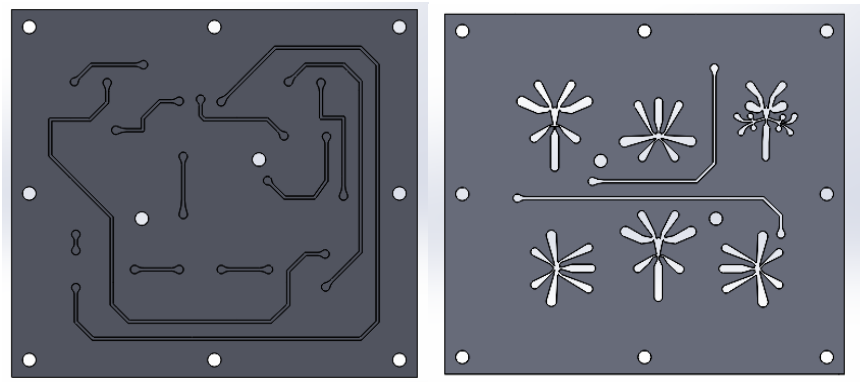


Рис. 2. 3D-модель микроструйного счетного триггера (нижняя и верхняя плоскости)

IV. Разработка микроструйного 4-х разрядного счетчика

На базе счетного триггера создана принципиальная схема 4-разрядного микроструйного (рис.3) счетчика, построенного на последовательном соединении четырех струйных триггеров. Каждый триггер обеспечивает деление частоты счетного импульса на два, а с его выхода снимается соответствующий разряд двоичного кода. Для реализации схемы в виде устройства разработана 3D-модель счетчика (рис.4), включающая каскады триггеров и межкаскадные прокладки. Модель учитывает все конструктивные улучшения, внесенные в счетный триггер, что гарантирует высокую надежность и эффективность работы счетчика в составе микроструйных систем.

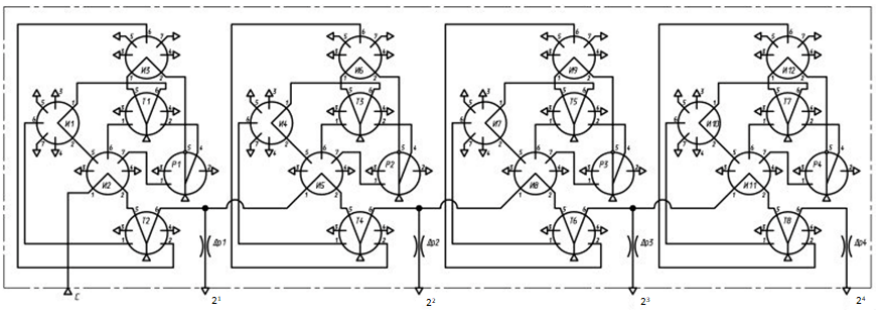


Рис. 3. Принципиальная схема 4-разрядного счетчика

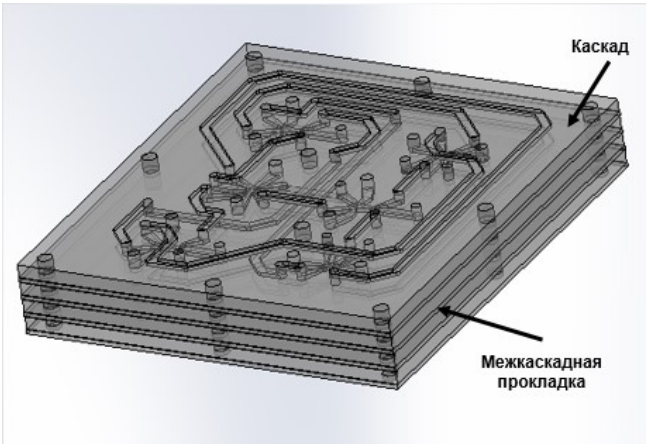


Рис. 4. 3D-модель микроструйного 4-разрядного счетчика

V. Разработка экспериментального стенда

Для определения передаточных характеристик счетчика был разработан экспериментальный стенд, включающий тактовый семикаскадный генератор и два счетных триггера. Блок питания стенда оснащен системой фильтрации и регулировкой давления параметров питающего потока. Контроль давления осуществляется с помощью манометра, обеспечивающего стабильность работы устройства синхронизации.

Измерение параметров пневмоимпульсов реализовано с использованием пьезоэлектрического датчика мембранного типа. Датчик состоит из разделенной мембраной полости, на которую закреплен дисковый пьезокерамический элемент с серебряными электродами. Подача противофазных импульсов вызывает колебания мембраны, которые преобразуются пьезоэлементом в электрические сигналы. Форма и частота сигналов регистрируются осциллографом, что позволяет анализировать динамические характеристики системы с высокой точностью.

На рисунке 5 представлена принципиальная схема разработанного стенда для исследования микроструйного устройства синхронизации.

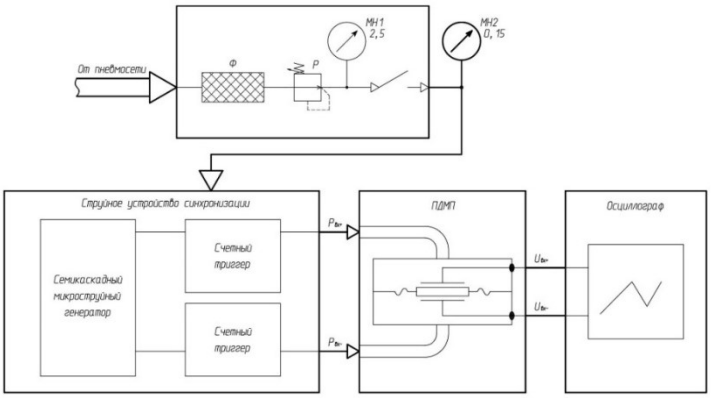


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментального стенда

VI. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана принципиальная схема микроструйного устройства синхронизации, построенного на основе 4-х разрядного счетчика в интегральном исполнении. Ключевым элементом счетчика является микроструйный счетный триггер, усовершенствованный по сравнению с образцом [2] в части уменьшения емкости коммутационных каналов и оптимизации геометрического профиля реле. Созданы 3D-модели счетного триггера и 4-х разрядного счетчика. Для исследования функциональных характеристик микроструйного устройства синхронизации разработана принципиальная схема экспериментального стенда.

Литература

[1] *Балабанов А.В., Бобылев Д.А., Ивасюта В.В.* Методика экспериментального исследования пьезоэлектрических датчиков мембранного типа // *Датчики и системы*. 2023. № 6. С. 19-24.

[2] *Balabanov A.V., Mamontova A.A., Sukhorukov A.A.* Research of Free Oscillations of Membranes by Means of Microfluidic Pulses / *Proceedings of 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023)*. Astrakhan, Russian Federation: IEEE, 2023. P. 1-4.

[3] *Балабанов А.В., Дуда Л.Ю., Соколов А.О.* Разработка микроструйного счетного триггера // *Датчики и Системы*. 2024. № 5. С. 47-51.

Модель надежности системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА

Е. А. Барабанова, К. А. Вытовтов, М. Г. Иванов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,
Elizavetaalexb@yandex.ru, vytovtov_konstan@mail.ru, ivanov.webdesign@yandex.ru

***Аннотация**. В рамках данного исследования на основе предлагаемой авторами и представленной в предыдущих работах функциональной схемы системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА разработана ее структурная схема надежности. Представлена статическая модель надежности системы и записаны выражения для нахождения вероятности безотказной работы системы для двух случаев: когда время жизни ее компонент распределено по экспоненциальному закону и закону Вейбулла-Гнеденко. Предлагаемая модель позволяет оценивать надежность разрабатываемой системы на различных этапах ее функционирования: участке приработки и участке старения элементов системы.*

I. Введение

В настоящее время БПЛА используются повсеместно во многих областях: для доставки грузов, экологического мониторинга, орошения сельскохозяйственных угодий и т.д. [1]. Но, несмотря на положительные моменты, связанные с использованием БПЛА, их применение может негативным образом сказываться на функционировании рядом расположенных объектов связи. Это происходит, если сигналы управления и передачи данных, используемые для работы БПЛА, попадают в рабочий радиочастотный диапазон средств связи. В связи с этим разработка систем, позволяющих вовремя обнаруживать радиоизлучения малой мощности от БПЛА, и принимать меры по исключению факторов их негативного влияния на расположенные рядом средства связи, является одной из важнейших задач. Одним из таких решений является система мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА, предложенная авторами в [2]

Ключевой задачей при проектировании системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА является использование надежных элементов и схемных решений, повышающих устойчивость данной системы к различным внутренним воздействиям, вызывающих старение элементов, нарушениям работы, вызванных скачками напряжения, изменениями погодных условий и т.п. Прежде всего для решения данной задачи необходимо детально изучить процесс функционирования системы и разработать структурную схему надежности [3,4]. Далее требуется рассчитать показатели надежности системы, такие как коэффициент готовности и вероятность безотказной работы. Оценив данные показатели можно предложить дополнительные меры по повышению надежности функционирования системы, такие как дублирование наименее надежных элементов, резервирование каналов связи и управления и т.д.

II. Основная часть

В данной работе рассматривается система мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА [2], принципы работы которой описаны в работе [2]. На основе анализа функционирования данной системы была разработана ее структурная схема надежности, состоящая из соединенных последовательно базовых блоков (см. рисунок 1): 1-антенно-фидерная система; 2- блок входных фильтров; 3-блок предуселителя; 4-блок основного усиления; 5-блок детектирования; 6-блок усиления; 7-аналого-цифровой преобразователь; 8-центральный микроконтроллер; 9-сервопривод «1»; 10-сервопривод «2».

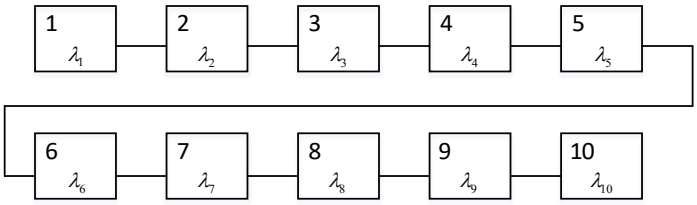


Рис.1. Структурная схема надежности системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА

Каждый из базовых блоков в свою очередь состоит из ряда элементов, соединенных между собой в соответствии с принципиальной схемой блока, что определяет значение интенсивности отказов данного блока ($\lambda_i, i = \overline{1,10}$). Например, антенно-фидерная система состоит из четырех широкополосных детекторных антенн, а блок входных фильтров включает четыре СВЧ-фильтра. В соответствии со схемой надежности и учитывая, что время между отказами распределено по экспоненциальному закону, вероятность безотказной работы всей системы (функция надежности) будет определяться по формуле:

$$P(t) = \exp\left(\sum_{i=1}^{10} \lambda_i\, t\right)$$

В теории надежности также находит широкое применение распределение Вейбулла–Гнеденко, которое широко используется для описания работы электронных и других компонент устройств систем связи и управления [5]. Распределение Вейбулла–Гнеденко характеризуется двумя параметрами: параметром масштаба α и параметром формы β, а вероятность безотказной работы отдельного базового блока системы, отказы которого подчиняются данному распределению, определяется с использованием следующего выражения: $P(t) = \exp\left(-\frac{t\beta}{\alpha}\right)$. Учитывая схему надежности системы (см. рисунок 1), вероятность ее безотказной работы можно определить по формуле:

$$P(t) = \exp\left(\sum_{i=1}^{10} \left(-\frac{t}{\alpha_i}\right)^{\beta_i}\right)$$

В зависимости от значений α и β базовых блоков системы, можно оценить ее надежность на начальном этапе эксплуатации, когда интенсивность отказов уменьшается со временем, и в период старения элементов, когда она возрастает.

III. Заключение

В данной работе представлена структурная схема надежности системы мониторинга, обнаружения и сопровождения радиоизлучения малой мощности БПЛА, а также выражения для нахождения вероятностей безотказной работы данной системы. Предлагаемая модель позволяет оценивать надежность разрабатываемой системы на различных этапах ее функционирования.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00926, https://rscf.ru/project/25-29-00926/

Литература

[1] *М.Х. Барчо, М.А. Ковток, С.М. Назарян, Д.Е. Шайхудинов*. Применение беспилотных летательных аппаратов как элемент цифровой трансформации сельского хозяйства// Вестник Академии знаний № 1 (66), 2025. С.69-73.

[2] *Вытовтов К.А., Барабанова Е.А., Иванов М.Г.* Локальная радиолокационная система навигации для привязных высотных платформ // Автоматизация в промышленности. 2024. №06 . С. 56-59.

[3] *Junho Song, Won-Hee, Young-Joo Lee, Junho Chun*. Structural system reliability: Overview of theories and applications to optimization. *J. Risk Uncertainty Eng. Syst.* Part A: Civ. Eng. 2021. No. 7 (2). P. 03121001. [

[4] *Koren I., Krishna C.M.* Fault tolerant systems. Elsevier, 2007. 378p.

[5] *Барабанова Е.А., Вытовтов К.А., Федоровская А.Н.* Математические модели и метод оценки надежности полностью оптических коммутаторов // *Computational nanotechnology*. 2024. Т. 11, № 5. С. 47-55.

Научное электронное издание

Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2025)

Материалы IX Международной научной конференции

Под общей редакцией д.т.н. Барабановой Е.А., д.т.н. К.А. Вытовтова

Локальное электронное издание

Номер госрегистрации в НТЦ "Информрегистр" 0322504467

Мин. системные требования:
Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Windows XP/7/8, Acrobat reader 4.0 и выше
Дата подписания к использованию 16.12.2025
1 электронно-оптический диск (CD-R), 23,8 Мб, Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
117997, Россия, Москва
ул. Профсоюзная, д. 65
www.ipu.ru