

ISSN 2619-0818

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 9 • № 1 • 2025



Барнаул

Издательство
Алтайского государственного
университета
2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Иордан В.И., к.ф.-м.н., доцент

Заместитель главного редактора

Седалищев В.Н., д.т.н., профессор

Члены редакционной коллегии

Безносюк С.А., д.ф.-м.н., профессор

Калачев А.В., к.ф.-м.н., доцент

Лагутин А.А., д.ф.-м.н., профессор

Макаров С.В., д.ф.-м.н., доцент

Оскорбин Н.М., д.т.н., профессор

Пашнев В.В., к.ф.-м.н., доцент

Плотников В.А., д.ф.-м.н., профессор

Поляков В.В., д.ф.-м.н., профессор

Ответственный секретарь

Шмаков И.А.

Ответственный за выпуск

Иордан В.И.

Учредителем издания является ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»

Журнал теоретических и прикладных исследований. Выходит 2 раза в год

Все права защищены. Ни одна из частей журнала, либо издание в целом, не могут быть перепечатаны без письменного разрешения авторов или издателя

ISSN 2619-0818

HIGH-PERFORMANCE COMPUTING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Vol. 9 • № 1 • 2025



Barnaul

**Publishing house
of Altai State University
2025**

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Jordan V.I., PhD of Physics and Mathematics, Associate Professor

Deputy Editor-in-Chief

Sedalishchev V.N., Doctor of Technical Sciences, Professor

Editorial Review Board

Beznosyuk S.A., Doctor of Physics and Mathematics, Professor

Kalachev A.V., PhD of Physics and Mathematics, Associate Professor

Lagutin A.A., Doctor of Physics and Mathematics, Professor

Makarov S.V., Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor

Oskorbin N.M., Doctor of Technical Sciences, Professor

Pashnev V.V., PhD of Physics and Mathematics, Associate Professor

Plotnikov V.A., Doctor of Physics and Mathematics, Professor

Polyakov V.V., Doctor of Physics and Mathematics, Professor

Executive Secretaries

Shmakov I.A.

Responsible for Issue

Jordan V.I.

The Founder of the Journal is Altai State University

The Journal contains the results of theoretical and applied original research. Published half-yearly

All rights reserved. No publication in whole or in part may be reproduced without the written permission of the authors or the publisher

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель редакционного совета

Тарасов И.Е., д.т.н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия).

Члены редакционного совета

Алымов М.И., член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, директор Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова (Черноголовка, Россия).

Аврамчук В.С., д.т.н., профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники университет (Томск, Россия).

Гаращенко Ф.Г., д.т.н., профессор, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко (Киев, Украина).

Гулай А.В., к.т.н., профессор, Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь).

Гулуев Г.А. оглы, д.т.н., профессор, зав. лаб. Института систем управления Национальной академии наук Азербайджана (Баку, Азербайджан).

Гуляев П.Ю., д.т.н., профессор, Югорский государственный университет (Ханты-Мансийск, Россия).

Кадыров И.Ш., д.т.н., профессор, Кыргызский национальный аграрный университет им. К.И. Скрябина (Бишкек, Кыргызстан).

Косарев В.Ф., д.ф.-м.н., с.н.с., Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия).

Крючкова Е.Н., к.ф.-м.н., профессор, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Барнаул, Россия).

Мещеряков Р.В., д.т.н., профессор, г.н.с., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, Россия).

Мирзаев Н.М., д.т.н., с.н.с., Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (Ташкент, Узбекистан).

Опарин Г.А., д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (Иркутск, Россия).

Прадо П.Ф., профессор кафедры компьютерных наук и электроники, Федеральный университет Эспириту-Санту (Витория, Бразилия).

Писсинато Б., профессор, Методистский университет Парасикаба (Парасикаба, Бразилия).

Потехин Д.С., д.т.н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия).

Пронин С.П., д.т.н., профессор, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Барнаул, Россия).

Титов В.С., д.т.н., профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Россия).

Фазылов Ш.Х., д.т.н., профессор, Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (Ташкент, Узбекистан).

Филимонов А.Б., д.т.н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия).

Филимонов Н.Б., д.т.н., профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Шурина Э.П., д.т.н., профессор, Новосибирский государственный технический университет
(Новосибирск, Россия).

Якунин А.Г., д.т.н., профессор, Алтайский государственный технический университет им.
И.И. Ползунова (Барнаул, Россия).

EDITORIAL ADVISORY BOARD

Chairman of the Editorial Advisory Board

Tarasov I.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia).

Members of the Editorial Advisory Board

Alymov M.I., Corresponding Member of the RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director-General of Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science (Chernogolovka, Russia).

Avramchuk V.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia).

Garashchenko F.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko Kyiv National University (Kyiv, Ukraine).

Gulay A.V., PhD of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus).

Guluev G.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences (Baku, Azerbaijan).

Gulyaev P.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Ugra State University (Khanty-Mansiysk, Russia).

Kadyrov I.Sh., Doctor of Technical Sciences, Professor, Skryabin Kyrgyz National Agrarian University (Bishkek, Kyrgyzstan).

Kosarev V.F., Doctor of Physics and Mathematics, Senior Staff Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russia).

Kryuchkova E.N., PhD of Physics and Mathematics, Professor, Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia).

Meshcheryakov R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Trapeznikov Institute of Control Problems RAS (Moscow, Russia).

Mirzaev N.M., Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence (Tashkent, Uzbekistan).

Oparin G.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Science of Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS (Irkutsk, Russia).

Prado P.F., Professor, Department of Computer Science and Electronics, Federal University of Espirito Santo (Vitoria, Brazil).

Pissinato B., Professor, Methodist University of Piracicaba (Piracicaba, Brazil).

Potekhin D.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia).

Pronin S.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia).

Titov V.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia).

Fazilov Sh.Kh., Doctor of Technical Sciences, Professor, Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence (Tashkent, Uzbekistan).

Filimonov A.B., Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia).

Filimonov N.B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia).

Shurina E.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia).

Yakunin A.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia).

СОДЕРЖАНИЕ

**МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ,
МНОГОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ И ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ
СТРУКТУРЫ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

Тарасов И.Е. Архитектура массово-параллельного вычислительного устройства на базе специализированных процессоров	13
Линьков А.К. Реализация алгоритма обработки стереокадров с использованием ПЛИС	20
Минакова Н.Н., Мансуров А.В. Пример организации лабораторного практикума по пен-тестингу с гибридным использованием виртуальной лабораторной среды	26
Калачев А.В. Многопоточная микроархитектура RISC-V – управление потоками	35
Дуксин И.И. Верификация специализированных вычислителей	39
Дуксин Н.А. Управление реконфигурируемой кластерной системой программируемой логики ..	44
Люлява Д.В. Подход к оценке равномерности распределения вычислительной логики по стадиям конвейерного вычислителя с учётом характеристик аппаратной платформы	50
Щепухин Д.О. Вопросы конфигурирования массово-параллельной гетерогенной вычислительной системы	57
Потехин Д.С., Гришанович Ю.В., Потехин С.Д. Построение генератора частоты с подстройкой по сигналам передатчиков СДВ-диапазона и сигналов GLONASS/GPS	62

**ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЯВЛЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ОБЛАСТЯХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Марков С.И., Кутищева А.Ю., Штанько Е.И., Добролюбова Д.В., Иткина Н.Б., Шурина Э.П. Параллельные методы решения многофизических задач в геофизических приложениях	70
Антропов Е.В., Фаерман В.А., Курков Д.В. Анализ и имплементация вычислительных схем протокола исправления ошибок АУНІ в квантовом распределении ключей	79
Дмитриев А.А., Дмитриев Д.А. Цифровая обработка текстовых сообщений для нахождения тематически близких слов	86
Решетов В.Е., Иордан В.И., Бледнов В.А. Модернизация архитектуры и оптимизация использования ресурсов памяти в программном пакете для моделирования газотермических покрытий и их функциональных характеристик	91

**РОБОТОТЕХНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ,
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Журавлева В.В., Маничева А.С., Корней Д.В., Метальников А.И. Применение машинного обучения в компьютерной диагностике пациентов с дисплазией соединительной ткани	97
Брылев О.А., Гончаров В.И., Розум Д.И. Диагностика технического состояния подвески автомобиля на основе оценки параметров математической модели	102
Калачев А.В., Лаптев А.В. Автоматизация решения CAPTCHA в текстовом формате	109
Маликов В.Н., Ишков А.В., Фадеев Д.А. Компьютеризированные исследования тонких металлических пленок с использованием вихретокового метода	117
Кадыров И.Ш., Турусбеков Б.С., Жаныбекова Б.Ж., Нарымбетов М.С., Кемелова С.К. Оптимизация структуры системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора малых гидроэлектростанций	123

Кадыров И.Ш., Турусбеков Б.С., Жаныбекова Б.Ж., Нарымбетов М.С., Кемелова С.К. Методы синтеза регуляторов токов в системе автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора малых гидроэлектростанций	133
Седалищев В.Н., Краев Р.В., Сеулеков А.В., Калинин Н.Н. Исследование метрологических характеристик составных пьезотрансформаторных измерительных преобразователей с использованием метода имитационного моделирования	144
Суторихин И.А., Соловьев В.А. Приборный комплекс контроля гидрофизических параметров пресноводных водоемов	152
Демьянов Н.А., Сорокин М.М., Степанов Д.Ю. Методы репетиции внедрения ERP-систем ...	158
Тихомирова З.В., Козлов Д.Ю., Соколова Г.Г. Разработка алгоритма измерения морфологических признаков листьев вяза мелколистного с помощью компьютерного зрения	163
Шимко Е.А., Утемесов Р.М., Бочкарева Е.Д. Применение технологий компьютерного зрения для автоматического анализа движений нижней челюсти человека	170
Торобеков Б.Т., Кошоева Б.Б., Азимова А.А., Бакалова А.Т., Жамгырчиева Г.Т. Разработка информационной системы мониторинга образовательного процесса ВУЗА	176
Кожин М.А., Филимонов Н.Б. Потенциальное управление группой мобильных роботов в среде с динамическими препятствиями модифицированным методом жука	188
Ян Шуай, Филимонов Н.Б. Проблемы консенсуса мультиагентных систем: состояние и перспективы	197

CONTENTS

MULTI-PROCESSOR COMPUTING SYSTEMS, MULTI-CORE PROCESSORS AND PROGRAMMABLE LOGIC STRUCTURES, DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Tarasov I.E. Architecture of a Massively Parallel Computing Device Based on Specialised Processors	13
Linkov A.K. Implementation of Stereo Frame Processing Algorithm Using FPGA	20
Minakova N.N., Mansurov A.V. An Example of Using the Hybrid Virtual Lab Environment for Pen-Testing Lab Practicums	26
Kalachev A.V. RISC-V Multithreaded Microarchitecture – Flow Control	35
Duksina I.I. Verification of Specialized Computators	39
Duksin N.A. Control of Reconfigurable Cluster Programmable Logic System	44
Lyulyava D.V. An Approach to Evaluating the Regularity of Computational Logic Distribution Across the Stages of a Pipelined Computing Device Considering the Specification of the Hardware Platform ..	50
Shchepukhin D.O. Configuration Issues of a Massively Parallel Heterogeneous Computing System	57
Potekhin D.S., Grishanovich U.V., Potekhin S.D. Construction of a Frequency Generator with Tuning Based on Signals from Ultra-Long Wave Range and GLONASS/GPS Signals	62

PARALLEL PROGRAMMING AND COMPUTER SIMULATION OF PHENOMENA AND PROCESSES IN NATURAL SCIENCE WITH USING OF PARALLEL COMPUTING

Markov S.I., Kutishcheva A.Yu., Shtanko E.I., Dobroliubova D.V., Itkina N.B., Shurina E.P. Parallel Methods for Solving Multiphysics Problems in Geophysical Applications	70
Antropov E.V., Faerman V.A., Kurkov D.V. Analysis and Implementation of Computational Schemes for AIHY Key Reconciliation Protocol in Quantum Key Distribution	79
Dmitriev A.A., Dmitriev D.A. Digital Processing of Text Messages to Find Thematically Close Words	86
Reshetov V.E., Jordan V.I., Blednov V.A. Architecture Upgrade and Optimization of Memory Resources Usage in a Software Package for Simulation of Gas-Thermal Coatings and Their Functional Characteristics	91

ROBOTICS, CONTROL AUTOMATION, PRODUCTION AUTOMATION AND AUTOMATION OF SCIENTIFIC EXPERIMENT

Zhuravleva V.V., Manicheva A.S., Korney D.V., Metalnikov A.I. Usage Application of Machine Learning in Computer Diagnostics of Patients with Connective Tissue Dysplasia	97
Brylev O.A., Goncharov V.I., Rozum D.I. Diagnosis of the Technical Condition of a Vehicle Suspension Based on Estimation of Model Parameters	102
Kalachev A.B., Laptev A.V. Automation of Text-Based CAPTCHA Solving	109
Malikov V.N., Ishkov A.V., Fadeev D.A. Digital Methods for Studying the Electrical Conductivity of Thin-Film Metal Structures Using an Eddy Current Transducer	117
Kadyrov I.Sh., Turusbekov B.S., Zhanybekova B.Zh., Narymbetov M.S., Kemelova S.K. Optimization of the Structure of the Automatic Control System by Excitation of a Synchronous Generator of Small Hydroelectric Power Plants	123
Kadyrov I.Sh., Turusbekov B.S., Zhanybekova B.Zh., Narymbetov M.S., Kemelova S.K. Methods of Synthesis of Current Regulators in the System of Automatic Control by Excitation of a Synchronous Generator of Small Hydroelectric Power Plants	133
Sedalishchev V.N., Kraev R.V., Seulekov A.V., Kalinin N.N. Investigation of the Metrological Characteristics of Composite Piezotransformer Measuring Transducers Using the Simulation Method	144

Sutorikhin I.A., Soloviev V.A. Instrumentation Complex for Monitoring Hydrophysical Parameters of Freshwater Ponds	152
Dem'yanov N.A., Sorokin M.M., Stepanov D.Yu. The Rehearsal Methods of ERP-Systems Implementation	158
Tikhomirova Z.V., Kozlov D.Yu., Sokolova G.G. Development of an Algorithm for Measuring Morphological Features of Small-Leaved Elm Leaves Using Computer Vision	163
Shimko E.A., Utemesov R.M., Bochkareva E.D. Application of Computer Vision Technologies for Automatic Analysis of Human Mandibular Movements	170
Torobekov T.B., Koshoeva B.B., Azimova A.A., Bakalova A.T, Jamgyrchieva G.T. Development of an Information System for Monitoring the Educational Process of a Higher Education Institution	176
Kozhin M.A., Filimonov N.B. Potential Control of Mobile Robot Group in Environment with Dynamic Obstacles Based on Modified Bug Algorithm	188
Yang Shuai, Filimonov N.B. Consensus Problems in Multi-Agent Systems: State and Prospects	197

АРХИТЕКТУРА МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОРОВ

В статье рассматривается архитектура массово-параллельного вычислителя с независимо программируемыми вычислительными узлами, представляющими собой специализированные процессоры. Реализация подобных систем требует решения целого ряда разноплановых задач, от выбора соответствующей предметной области до проектирования архитектуры и реализации компонентов системы. Разработка устройств с регулярной сеткой процессорных ядер приводит к возникновению проблемы передачи данных этим ядрам, а также ставит задачу обеспечения необходимого объема памяти для работы процессоров. Вместе с тем выбор задач, ориентированных на обработку одного потока данных множеством алгоритмов или параметризованных модификаций одного алгоритма, позволяет реализовать массово-параллельную вычислительную систему, параллельно обрабатывающую входной поток данных. Выбор архитектурного шаблона в виде параллельно работающих специализированных процессорных ядер в сочетании с динамически загружаемой конфигурацией отдельных регионов программируемой логической интегральной схемы позволил создать методику проектирования массово-параллельных вычислительных устройств на базе процессорных ядер и разработать макет устройства для работы в составе специализированного программно-аппаратного комплекса.

Ключевые слова: архитектура, параллельная вычислительная система, процессор, ПЛИС, массовый параллелизм.

Введение

Одним из направлений проектирования высокопроизводительных программно-аппаратных комплексов является комбинирование подсистем общего назначения и специализированных ускорителей, ориентированных на узкие подклассы задач. При этом непосредственный перенос алгоритма на языки описания аппаратуры с последующим созданием узкоспециализированной микросхемы чрезмерно сужает область применения такого устройства и создает целую группу технико-экономических рисков, начиная от невозможности модификации реализованного ускорителем алгоритма, и заканчивая неоптимальными решениями, принимаемыми на различных этапах разработки, с учетом того, что исходное описание требуемого целевого алгоритма должно учитывать различные аспекты схемотехнического представления и характеристик топологического базиса, на который ориентирована создаваемая специализированная микросхема. Надлежащий учет этих аспектов затруднен вследствие того, что требования и ограничения формируются не только в сфере описания алгоритма, но и на уровнях платформенно-независимой и платформенно-зависимой представления схемы.

Возможным направлением деятельности в сфере создания специализированных программно-аппаратных комплексов является их дополнение программируемыми ускорителями с массово-параллельной архитектурой. Возможность программирования отдельных узлов существенно расширяет функциональность такого ускорителя, перенося ограничения на уровень архитектуры узла и доступных ему аппаратных ресурсов. При этом ряд задач, такие как алгоритмы дискретной математики, цифровой обработки сигналов, прикладной статистики и ряд других, доступны для реализации на базе массово-параллельного вычислительного устройства, состоящего из набора независимо программируемых процессоров.

Массовый параллелизм, заключающийся в параллельной обработке одного и того же потока входных данных, решает важную фундаментальную проблему современной цифровой микроэлектроники – необходимость избежать негативного влияния «стены интерфейсов». Этот эффект [1] заключается в опережающем росте производительности вычислений по сравнению с пропускной способностью внешних интерфейсов. Его практическим следствием является невозможность обеспечения независимых потоков данных для большого количества обрабатывающих устройств, размещаемых на одной полупроводниковой пластине. При этом параллельная обработка одного и того же потока данных позволяет ограничиться технически достижимой пропускной способностью интерфейсов, однако при этом необходимо ограничить также и требования процессорных ядер к обмену данными с внешней памятью. Поэтому далее будет рассмотрена архитектура, предполагающая реализацию независимо программируемых специализированных процессорных ядер,

параллельно обрабатывающих один поток данных и используемых в качестве аппаратного ускорителя вычислений в составе программно-аппаратного комплекса.

В настоящее время возможности совместного применения процессоров общего назначения и аппаратных ускорителей достаточно активно освещаются в научно-технических изданиях. Общее представление об архитектуре вычислительной системы подробно освещено в [1, 2], а рассматриваемая основная задача [3], для которой получен патент на полезную модель, соответствует общей архитектуре массово-параллельных вычислений [4]. Можно отметить применение массового параллелизма в алгоритмах на графах [5], цифровой обработке изображений [6], прикладной статистике [7]. При этом необходимо отметить, что в ряде случаев алгоритмы, описываемые с точки зрения программной модели, могут подразумевать эффективную аппаратную реализацию на базе специализированных ускорителей с массовым параллелизмом [8].

Взаимодействие уровней проектирования специализированной вычислительной системы

Разделение уровней проектирования имеет целью частично изолировать проектные мероприятия, выполняемые специалистами различных профилей, выделив области, в которых выполняются локальные оптимизации характеристик. На рисунке 1 показаны уровни проектирования специализированной вычислительной системы, которые включают в себя создание программной модели уровня транзакций, RTL-представление на языке описания аппаратуры и топологическое представление в виде конфигурации ПЛИС или физического проекта СБИС.

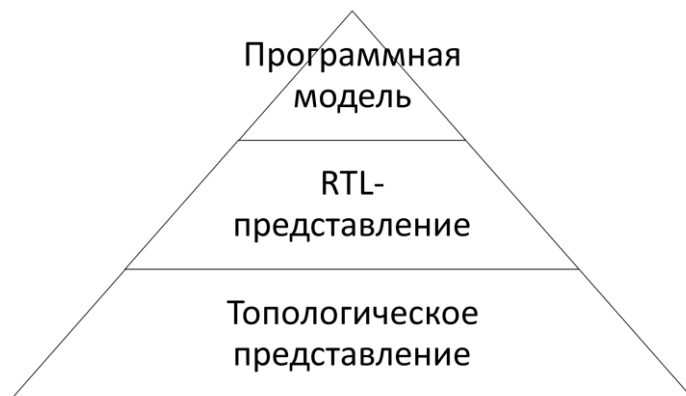


Рис. 1. Уровни проектирования специализированной вычислительной системы

Повышение уровня абстрагирования при проектировании призвано повысить продуктивность разработки, однако с точки зрения общей методологии это же повышение приводит к игнорированию деталей реализации. Предполагается, что при надлежащей организации разработки игнорируемые детали окажутся несущественными и их рассмотрение на нижележащих уровнях проектирования не приведет к возникновению неустранимых препятствий.

При переходе от программной модели к RTL-представлению возможно внесение в программную модель свойств системы, которые не могут быть адекватно отражены в синтезируемом RTL-представлении. К ним относятся:

1. Несинтезируемые вычисления для комбинационных узлов (например, вычисление транзакционных функций за один такт).
2. Конфликты доступа к ресурсам (например, одновременные операции чтения и записи в память в пределах одного такта).

При переходе от RTL-представления к топологической реализации схемы возможны проблемы в виде превышения объема логических ресурсов, уменьшения тактовой частоты ниже заданных пределов и превышение заданного уровня потребляемой мощности. В целом превышение потребляемой мощности не относится к критическим проблемам при проектировании на базе ПЛИС начального и среднего уровня, поскольку конфигурируемые ресурсы ПЛИС не формируют настолько плотную компоновку активно работающих элементов, как это характерно для высокопроизводительных СБИС. Поэтому вопросы отведения тепла от ПЛИС семейств AMD Artix, Spar-

tan, Intel Cyclone, Gowin GW5, Pango Micro Logos не представляются критичными и решаются техническими способами на уровне выбора соответствующей системы активного охлаждения.

Вопросы получения достаточно компактного с точки зрения ресурсов решения и достижения заданного уровня тактовой частоты в целом являются взаимосвязанными, поскольку компактная схема при отсутствии избыточно сложных узлов комбинационной логики, как правило, имеет и низкие показатели задержек распространения сигналов. Поэтому ориентация на относительно простые функциональные узлы обуславливает получение приемлемых результатов на всех этапах разработки, включая реализацию топологического представления. В частности, можно учитывать возможность отказа от операций цифровой обработки сигналов, использующих параллельные схемы умножения независимых операндов, поскольку они подразумевают использование относительно сложного дерева сумматоров. В то же время, эти операции допустимы для использования в составе ПЛИС.

Архитектурный подход к реализации массово-параллельной вычислительной системы на базе специализированных процессоров

Архитектура массово-параллельной вычислительной системы на базе независимо программируемых процессорных ядер показана на рисунке 2. Система разделена на вычислительные кластеры, которые могут размещаться в одной из модификаций, ориентированных на соответствующие подклассы задач. В качестве примера показаны варианты 1 – 3, которые для СБИС выбираются на этапе проектирования и имеют фиксированную схему, а для ПЛИС могут реконфигурироваться динамически в процессе эксплуатации системы.

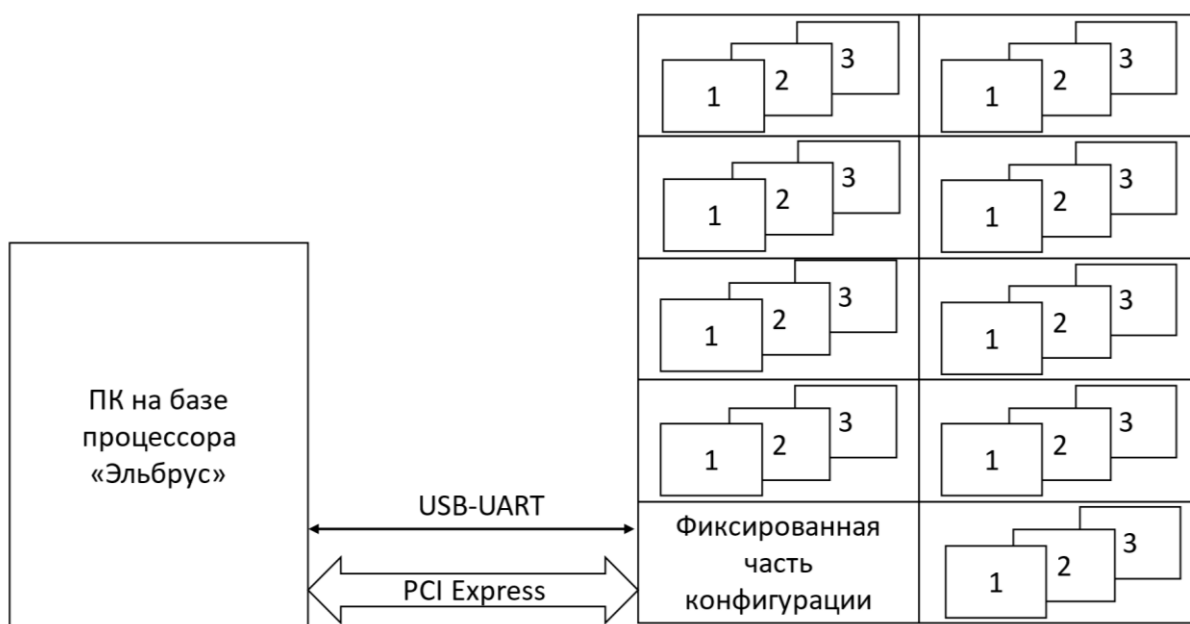


Рис. 2. Архитектура массово-параллельной вычислительной системы на базе независимо программируемых процессорных ядер

В представленной архитектуре используется управляющий компьютер на базе процессора «Эльбрус 2С3», обмен данными с которым происходит с помощью интерфейсов PCI Express Gen2 и USB-UART. Для обеспечения непрерывной работы интерфейса часть ПЛИС использует фиксированную конфигурацию, включающую в себя контроллер PCI Express и управляющий софт-процессор, а остальные фрагменты перезагружаются динамически на основе технологии Dynamic Function eXchange (DFX). Эта технология, ранее обозначавшаяся как Partial Reconfiguration («частичная реконфигурация»), имеет ограниченное применение на практике [9], несмотря на возможность достижения высокой эффективности в использовании ПЛИС [10].

Показанное деление ПЛИС на регионы соответствует физическому разделению ПЛИС с архитектурой FPGA на тактовые регионы. Для ПЛИС AMD, начиная с 90-нм серии Xilinx Virtex-4 используется архитектура ASMBL (Advanced Silicon Modular Blocks), предусматривающая разделение кристалла на вертикальные колонки, а начиная с серии 7 высота регионов внутри колонок

была унифицирована в пределах семейства ПЛИС. Ограничение размера тактового региона упрощает трассировку тактовых сетей внутри ПЛИС, уменьшая вариации фазы тактового сигнала в пределах региона по сравнению с возможными вариациями при распространении сигнала по всему кристаллу (хотя возможность глобального тактирования для серии 7 сохранена). Технически целесообразно производить выбор логических кластеров, совпадающих по размеру с тактовыми регионами ПЛИС, корректируя количество процессорных ядер в соответствии с ресурсами ПЛИС, имеющимися в соответствующем регионе.

В качестве процессорных ядер выбрана простейшая архитектура «выборка-исполнение» с конвейеризацией работы и продвижением адреса предвыборки по конвейеру. В сочетании с одно-тактным трактом данных такое решение позволило исключить такты «штрафа» при неверном предсказании перехода, поскольку вычисленный на этапе исполнения новый адрес команды продвигается по тракту управления на вход памяти команд. Это решение несколько снижает тактовую частоту, однако положительно влияет на алгоритмы потоковой обработки данных, делая работу процессора предсказуемой и не зависящей от результатов вычисления условий переходов. Структурная схема, на основе которой реализуется специализированное процессорное ядро, показана на рисунке 3.

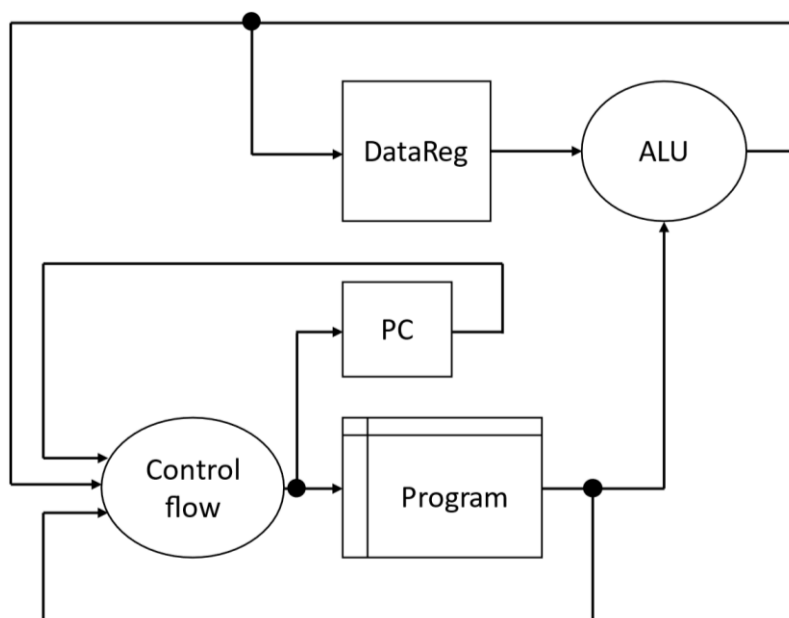


Рис. 3. Структурная схема специализированного процессорного ядра в составе массово-параллельной вычислительной системы

В показанной структурной схеме предполагается, что набор регистров данных DataReg и арифметико-логическое устройство ALU, а также логика формирования адреса следующей исполняемой команды уточняются в процессе разработки конкретной модификации ускорителя на основе автоматизированного анализа целевых алгоритмов.

В качестве базового варианта процессорного ядра реализовано устройство поиска фрагментов в потоке текстовых данных, для которого получен патент на полезную модель «устройство для сравнения строк с заданным шаблоном» [3].

Реализация макета вычислительной системы на базе ПЛИС

Макет вычислительной системы в варианте анализатора потоковых данных был разработан на базе ПЛИС AMD Artix-7, установленной на плате ALINX AX7203. Плата предназначена для установки в слот PCI Express, хотя поддерживает и автономное использование. Наличие цифровых интерфейсов GPIO допускает расширение логического объема ускорителя путем подключения дополнительных модулей на базе ПЛИС, для которых не требуется отдельный интерфейс PCI Express. Внешний вид платы показан на рисунке 4.

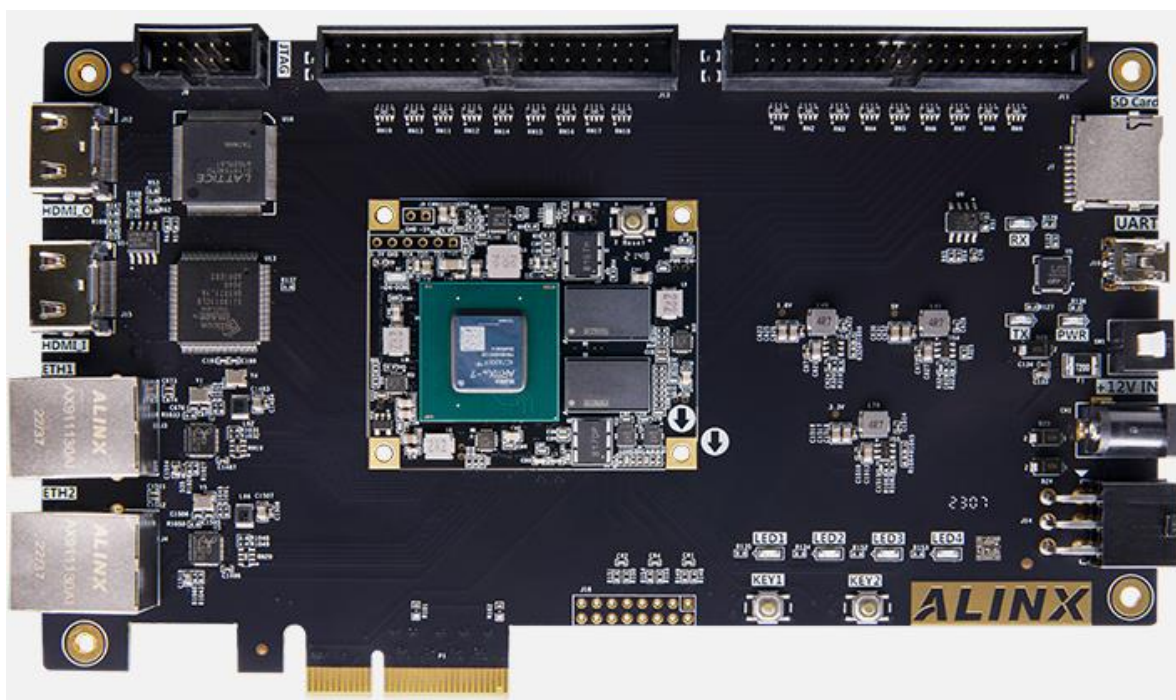


Рис. 4. Макет вычислительного устройства на базе платы ALINX AX7203

Установленная ПЛИС XC7A200 имеет 10 тактовых регионов, содержащие суммарно 365 независимых блоков памяти с организацией 1024x36. С учетом проведенных практических исследований, ограничивающим фактором для реализации многоядерной системы является количество независимых интерфейсов памяти, поскольку количество логических ячеек на один блок памяти оказался избыточным для реализации специализированных процессоров.

Тактовые регионы использованной ПЛИС не являются идентичными, изучение топологической организации показало, что левая и правая части кристалла содержат неодинаковое количество блоков памяти в регионах. Также верхние и нижние регионы, в которых размещены компоненты MGT, имеют меньшее количество блоков памяти. В итоге, количество блоков памяти варьируется от 20 до 50, причем три средних региона имеют 40 и 50 блоков памяти соответственно для двух сторон кристалла, расположенных по сторонам относительно центральной магистрали глобальных тактовых сигналов. Таким образом, имея регионы, содержащие 20, 23, 40 и 50 блоков памяти, необходимо разработать логические проекты, рассчитанные на указанное количество блоков, создав на их основе частичные конфигурации (partial configuration file) для каждого из регионов ПЛИС, подлежащих динамической реконфигурации в процессе работы. Подобный подход позволит производить непрерывную эксплуатацию программно-аппаратного комплекса, применяющего ускоритель такого типа, за исключением того, что в процессе смены конфигурации соответствующий регион ПЛИС временно прекращает работу. Однако при этом отсутствует необходимость полностью останавливать работу программного обеспечения комплекса, а тем более извлекать ускоритель для смены конфигурации ПЛИС.

Заключение

Рассмотренная в статье архитектура и метод проектирования позволяют разработать аппаратный ускоритель вычислений для работы в составе программно-аппаратных комплексов под управлением процессора общего назначения. Основными задачами для ускорителей с такой архитектурой является анализ потоковых данных, а в качестве алгоритмов рассматриваются алгоритмы дискретной математики (поиск фрагментов данных в соответствии с регулярными выражениями) и статистическая обработка данных ансамблевыми методами. Применение ускорителя вычислений с массово-параллельной архитектурой призвано повысить производительность программно-аппаратных комплексов на базе процессоров общего назначения. Планируется реализация образцов вычислительных систем для ускорения обработки потоковых данных в задачах дискретной математики, прикладной статистики и анализа запросов к базам данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hennessy J L, Patterson D. A. Computer Architecture. 6th Edition. A Quantitative Approach. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design. 2017. 936 p.
2. Sarah Harris and David Harris. Digital Design and Computer Architecture: RISC-V Edition. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2019.
3. Тарасов И.Е., Советов П.Н. Устройство для сравнения строк с заданным шаблоном // Патент на полезную модель № 231681 U1 Российская Федерация, МПК G06F 7/02, G06F 16/90: заявл. 28.11.2024; опубл. 05.02.2025; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет". EDN CUCUPT.
4. Yahya Jan & Lech Jozwiak. Scalable communication architectures for massively parallel hardware multi-processors // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2012. No. 72. P. 1450–1463. Doi: 10.1016/j.jpdc.2012.01.017.
5. Dory Michal & Matar Shaked. Massively parallel algorithms for approximate shortest paths // Distributed Computing. 2025. P. 1-32. Doi: 10.1007/s00446-025-00482-y.
6. Duany Omar Antonio Hernández. Scalable Parallel Module for Capturing Multiple Video Streams in Real Time // Journal of Information Systems Engineering and Management. 2025. Vol. 10, No. 38. P. 146-154. Doi: 10.146-154. 10.52783/jisem.v10i38s.6835.
7. Wu Di, Feng Qilong, Huang Junyu, Xu Jinhui, Huang Ziyun, Wang Jianxin. Fully-Scalable Massively Parallel Algorithm for k-center with Outliers // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2025. No. 39. P. 21519-21527. Doi: 10.1609/aaai.v39i20.35454.
8. Kosyanenko I. A., Bolbakov R. G. Dataset collection for automatic generation of commit messages // Russian Technological Journal. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 7-17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-7-17>. EDN: OQUHWL
9. Скляр А.А., Смахов Д.Г. Реализация широкополосных DDC на модуле FMC106P с использованием технологии PARTIAL RECONFIGURATION // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2019. Т. 9, № 3. С. 29-32. EDN GURDXN.
10. Koch D., Beckhoff C., Torrison J. Fine-grained partial runtime reconfiguration on Virtex-5 FPGAs // Proceedings - IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, FCCM 2010 : 18th IEEE International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, FCCM 2010, 02–04 мая 2010 года / sponsors: IEEE Computer Society Technical Committee, on Computer Architecture. – Charlotte, NC, 2010. P. 69-72. DOI 10.1109/FCCM.2010.19. EDN ODGPCT.

Тарасов Илья Евгеньевич

Д-р техн. наук, профессор кафедры корпоративных информационных систем,
МИРЭА - Российский Технологический Университет,
119454, Россия, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78
Эл. почта: tarasov_i@mirea.ru

I.E. TARASOV

ARCHITECTURE OF A MASSIVELY PARALLEL COMPUTING DEVICE BASED ON SPECIALISED PROCESSORS

The article considers the architecture of a massively parallel computer with independently programmable computing nodes, which are specialized processors. The implementation of such systems requires solving a number of diverse problems, from choosing the appropriate subject area to designing the architecture and implementing the system components. The development of devices with a regular grid of processor cores leads to the problem of data transmission to these cores, and also sets the task of providing the necessary memory for the processors. At the same time, the choice of tasks oriented to processing one data stream by multiple algorithms or parameterized modifications of one algorithm allows implementing a massively parallel computing system that processes the input data stream in parallel. The choice of an architectural template in the form of specialized processor cores operating in parallel in combination with a dynamically loaded configuration of individual regions of the programmable logic integrated circuit made it possible to create a methodology for designing massively parallel computing devices based on processor cores and to develop a device layout for operation as part of a specialized hardware and software complex.

Keywords: architecture, parallel computing device, processor, FPGA, massively parallelism.

REFERENCES

1. Hennessy J L, Patterson D. A. Computer Architecture. 6th Edition. A Quantitative Approach. *The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design*. 2017. 936 p.
2. Sarah Harris and David Harris. Digital Design and Computer Architecture: RISC-V Edition. *Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA*. 2019.
3. Tarasov I. E., Sovetov P. N. A device for comparing strings with a given pattern. Patent for utility model № 231681 U1, Russia, MPK G06F 7/02, G06F 16/90: publ. 28.11.2024; publ. 05.02.2025; "MIREA – Russian technological university". EDN CUCUPT.

4. Yahya Jan & Lech Jozwiak. Scalable communication architectures for massively parallel hardware multi-processors. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2012. No. 72. P. 1450–1463. Doi: 10.1016/j.jpdc.2012.01.017.
5. Dory Michal & Matar Shaked. Massively parallel algorithms for approximate shortest paths. *Distributed Computing*. 2025. P. 1-32. Doi: 10.1007/s00446-025-00482-y.
6. Duany Omar Antonio Hernández. Scalable Parallel Module for Capturing Multiple Video Streams in Real Time. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 2025. Vol. 10, No. 38. P. 146-154. Doi: 10.1007/s10138s.6835.
7. Wu Di, Feng Qilong, Huang Junyu, Xu Jinhui, Huang Ziyun, Wang Jianxin. Fully-Scalable Massively Parallel Algorithm for k-center with Outliers. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2025. No. 39. P. 21519-21527. Doi: 10.1609/aaai.v39i20.35454.
8. Kosyanenko I.A., Bolbakov R.G. Dataset collection for automatic generation of commit messages. *Russian Technological Journal*. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 7-17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-7-17>. EDN: OQUHWL
9. Sklyarov A.A., Smekhov D.G. Implementation of wideband DDC on the FMC106P module using technology “PARTIAL RECONFIGURATION”. *REDS: Telecommunication devices and systems*. 2019. Vol. 9. No. 3. P. 29-32. EDN GURDXN (in Russian).
10. Koch D., Beckhoff C., Torrison J. Fine-grained partial runtime reconfiguration on Virtex-5 FPGAs. *Proceedings - IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, FCCM 2010 : 18th IEEE International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, FCCM 2010, 02–04 мая 2010 года / sponsors: IEEE Computer Society Technical Committee, on Computer Architecture. – Charlotte, NC, 2010. P. 69-72. DOI 10.1109/FCCM.2010.19. EDN ODGPCT*.

Илья Е. Тарасов

Doctor of Technical Sciences, Professor of Corporate
Information Systems Department
MIREA – Russian Technological University,
78, Vernadsky ave., Moscow, Russia, 119454
Phone: +7- 499-215-65-65, E-mail: tarasov_i@mirea.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ СТЕРЕОКАДРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛИС

В данной статье анализируются возможности по параллельному выполнению построения карты глубины. Рассматриваются особенности алгоритма численного определения соответствий между фрагментами – SAD (Sum of absolute differences) на основе интенсивности пикселей. Обсуждаются теоретические аспекты внутренней структуры ПЛИС, в частности, систем на чипе. Рассматривается общий подход к исполнению алгоритмов на подобных системах. Предлагается структура вычислителя ячейки структуры, использующего массово параллельную обработку. Анализируются возможности применения таких систем.

Ключевые слова: стереоизображение, карта глубины, функция ошибки, System on Chip, параллельные вычисления, ПЛИС, ячейчатая структура.

Введение

Одной из основных функций систем технического зрения на основе стереокамер является построение карты глубины на основе информации, получаемой из пар смежных кадров [1]. Карта глубины (или 3D-карта) отображает положение окружающих объектов, в том числе расстояние до каждого из них. Далее эта информация передается на следующий уровень системы управления (мобильного робота, беспилотного транспорта и т.д.), что позволяет выносить определенные решения по дальнейшему управлению.

В данной работе рассматривается один из алгоритмов обработки данных, получаемых со стереокамер, и предлагаются возможности по его реализации с использованием ПЛИС. Данная статья является логическим продолжением обзорной публикации [2].

Описание алгоритма обработки

Рассмотрим один из наиболее простых алгоритмов построения карты глубины, а именно алгоритм SAD (Sum of absolute differences) [3, 4]. Один его шаг можно описать следующим образом:

1. Возьмем фрагмент левого кадра (*Reference window*), для которого нужно найти соответствие на правом кадре.
2. Определим область поиска на правом кадре. Как правило, это горизонтальный фрагмент изображения, поиск осуществляется со смещением влево относительно координат исходного фрагмента (рис. 1а)
3. Последовательно увеличивая смещение фрагмента (*Candidate window*) на правом кадре, осуществляем сравнение его с искомым фрагментом (с левого кадра).
4. Сравнение осуществляется по формуле:

$$SAD_{x,y} = \sum_{a=0}^W \sum_{b=0}^H |I_R(x+a, y+b) - I_L(x+a, y+b)|, \quad (1)$$

где $SAD_{x,y}$ – значение функции ошибки (matching cost) для заданной пары фрагментов;

x, y – координаты верхнего левого угла фрагмента;

W, H – ширина и высота фрагмента;

a, b – текущее смещение пикселей внутри фрагмента;

I_R, I_L – интенсивности пикселей левого и правого кадров.

Чем меньше значение SAD для пары фрагментов, тем больше их сходство (рис. 1б)

5. Проведя сравнение фрагментов по всей возможной области поиска (либо достигнув некоторого порогового значения), останавливаем поиск и сохраняем найденную пару фрагментов в качестве результата. В дальнейшем, исходя из их относительного смещения (диспаратности), будет возможно определить расстояние до объекта, изображенного на этих фрагментах [5, 6].

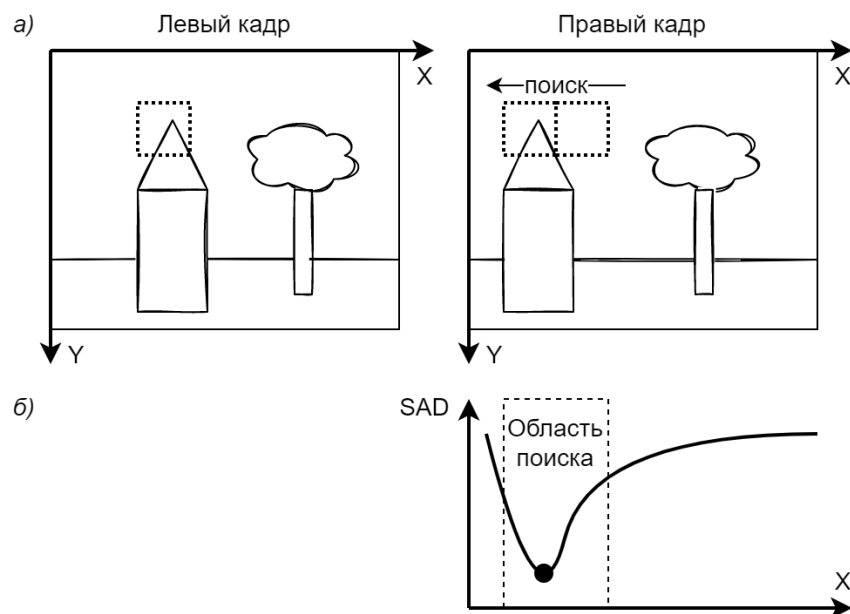


Рис. 1. Работа поискового алгоритма на основе SAD:
а) процесс поиска со смещением; б) поиск минимального значения SAD

Очевидно, что выше приведен лишь один шаг алгоритма для построения карты глубины. Этот шаг позволяет нам найти совпадение для одной пары фрагментов и получить лишь одну точку для итоговой 3D-карты. Соответственно, для получения целостной карты глубины необходимо данный шаг повторить по всей площади кадра.

Проанализировав полученный алгоритм для обработки одной пары фрагментов, а также и для всего кадра в целом, можно заметить, что он легко поддается разбиению на параллельные ветви. Его выполнение в параллельном виде позволит значительно ускорить обработку и построение карты глубины. Представляется возможным выполнять такую обработку близко к реальному времени [7], что позволяет применять такие алгоритмы на беспилотном транспорте и в иных подобных приложениях.

Аналогичным образом можно представить и иные алгоритмы для построения карты глубины, а именно *MAD*, *SSD* и прочие [8].

Внутренняя структура ПЛИС

Рассмотрим особенности структуры ПЛИС применительно к описанному выше алгоритму. В качестве примера на рисунке 2 упрощенно показана структура типовой системы на чипе (*SoC*, *System on Chip*), производимой компанией *Xilinx* [9]. Можно видеть, что система условно разделяется на программную и аппаратную часть (*PS region* и *PL region* соответственно). Программная часть, условно говоря, отвечает за управление памятью и другими ресурсами, а аппаратная часть – за собственно параллельные вычисления.

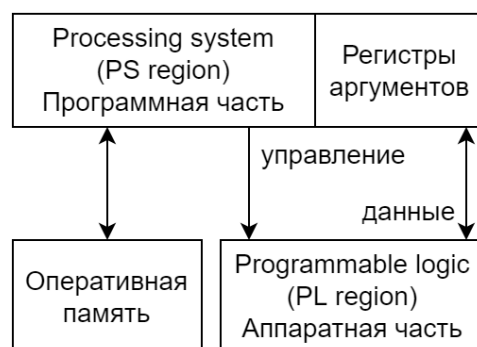


Рис. 2. Структура SoC Xilinx

На рисунке 3 показан пример распределения задач между двумя подсистемами при обработке пары стереокадров. Программная часть (*PS*) считывает кадры из оперативной памяти, выделяет буфер памяти для их обработки и отправляет данные в модуль *PL*. Основной алгоритм выполняется на модуле *PL* (он будет рассмотрен позже). Результат обработки – диспаратность, или карта глубины – возвращается в модуль *PS*, а затем в оперативную память.

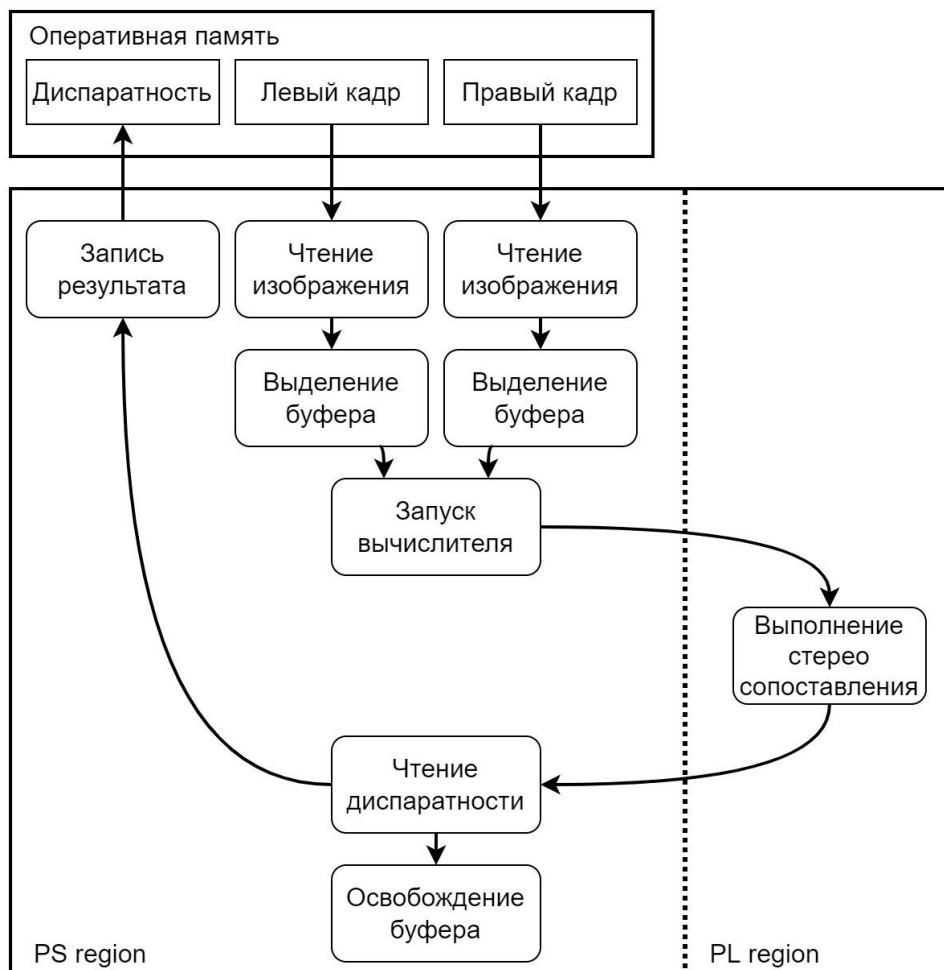


Рис. 3. Распределение задач между элементами SoC

Параллельное исполнение алгоритма SAD

Как было отмечено ранее, алгоритм построения карты глубины по методу *SAD* обладает большим потенциалом для ускорения при помощи параллельного подхода к вычислениям.

Согласно формуле (1), для вычисления значения *SAD* между двумя фрагментами кадров состоит из вычисления абсолютных разностей интенсивности каждой пары пикселей (*AD*) и дальнейшего их суммирования (*SUM*). Можно значительно ускорить выполнение данной операции, если выполнять расчет *AD* и суммирование *SUM* не последовательно, а параллельно, в «древовидном» режиме [10], как показано на рисунке 4. Проанализировав схему, можно видеть, что число «уровней» алгоритма для *N* операций сложения в данном случае составит $\log_2(N)$, суммарное время вычислений также соответственно уменьшится. Помимо прочего, такое распределение позволяет повысить общее использование (*utilization*) большого количества вычислительных блоков.

Стоит вновь отметить, что выше был рассмотрен лишь один цикл построения карты глубины, дающий в качестве результата одну точку – для получения целостной карты данный цикл следует повторить по всей площади кадра.

Схожим образом можно представить в параллельном виде и другие упомянутые ранее алгоритмы расчета сходства.

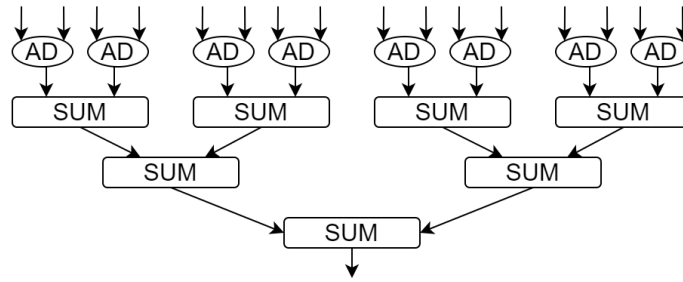


Рис. 4. Параллельное распределение операций

Возможности по реализации алгоритма на ПЛИС

Общая архитектура модуля SAD на основе представленного ранее параллельного подхода показана на рисунке 5. Так, модуль SAD состоит из блоков памяти, линейного буфера и ячеек обработки. Изображение-кандидат (*Candidate*) и эталонное изображение (*Reference*) передаются в пару ячеек памяти. Количество их пар равно D_{max} – максимальной диспаратности, рассматриваемой при поиске, т.е. размеру поискового окна. Далее изображение распределяется по линейному буферу соответствующего размера W .

Используются ячейки обработки двух типов. Первые (*AD*) отвечают за вычисление абсолютной разности между парой пикселей. Вторые (*SUM*) обеспечивают суммирование получаемых значений *AD*. Каждая ячейка также имеет конвейерный регистр, что позволяет оптимизировать выполнение вычислений.

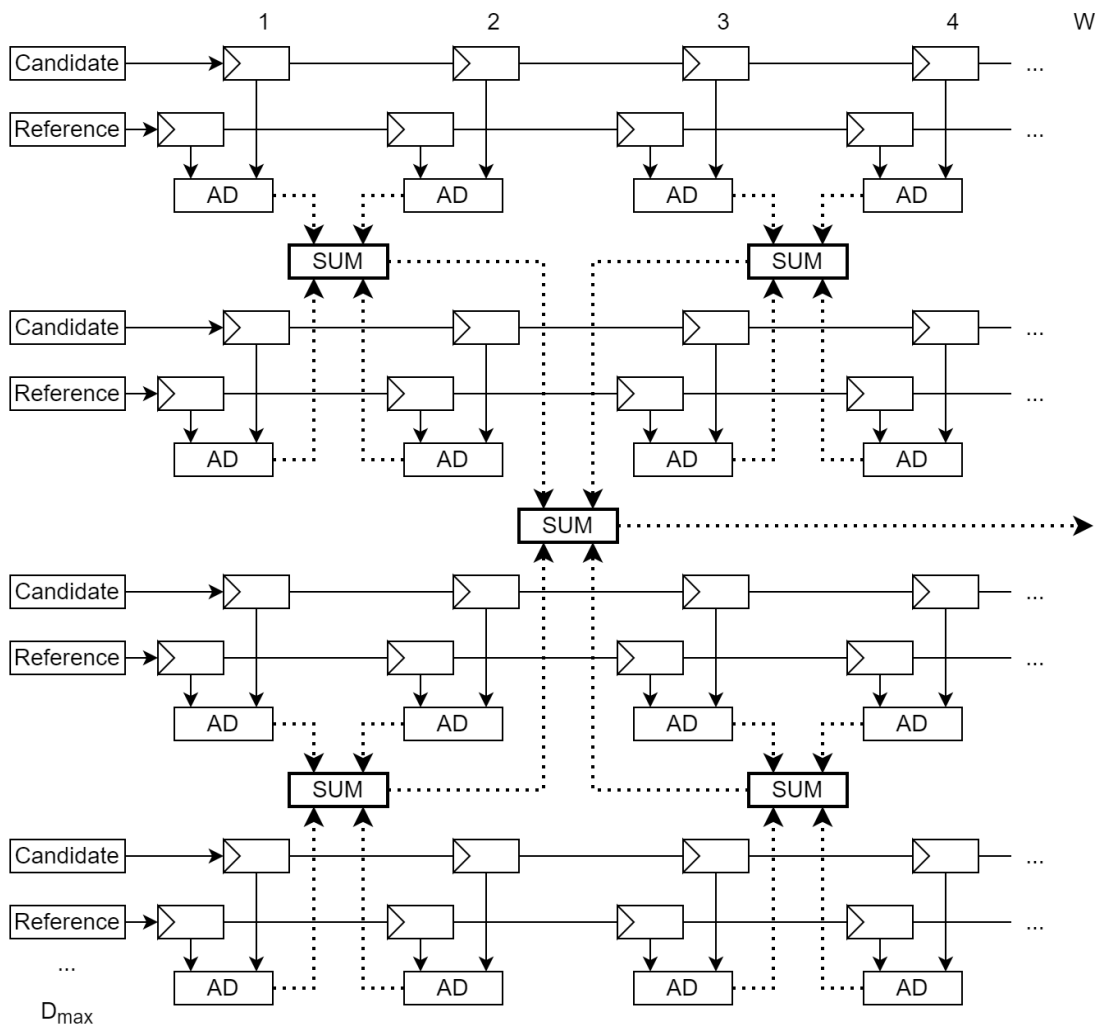


Рис. 5. Архитектура вычислительного модуля

Проанализировав данную схему, можно отметить следующие особенности:

– Для параллельного исполнения алгоритма требуется значительное количество вычислительных ячеек. В данном примере число ячеек для расчета AD составляет $(W \times D_{max})$. В свою очередь, каждый сумматор имеет 4 входа, они соединены древовидно. Число уровней суммирования, в соответствии с упомянутым выше логарифмическим выражением, составит $\log_4(N)$.

– Такая система легко поддается масштабированию, что позволяет использовать ее параллельно на нескольких чипах.

– При необходимости расчета карты глубины для изображений большего размера, достаточно лишь увеличить количество вычислительных ячеек.

Можно видеть, что большая часть алгоритма обработки представляет собой вложенные циклы. Для значительного повышения производительности целесообразно рассмотреть возможность параллельной обработки таких данных, т.е. применить концепцию SIMD (Single Instruction, Multiple Data – одна инструкция для множества однотипных данных). Повышение скорости обработки в перспективе позволит строить карту глубины в реальном времени, что будет большим преимуществом для бортовых вычислителей, применяемых в различных видах автономного транспорта.

Выводы

В данной статье показаны основные особенности алгоритма SAD , позволяющие реализовать его параллельное исполнение. Предложена иерархическая структура вычислительных ячеек на ПЛИС, эффективно использующая ресурсы вычислителя. Указаны особенности алгоритма и вычислительной системы, позволяющие повысить их производительность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klette R. Concise computer vision. London: Springer, 2014. Vol. 233.
2. Линьков А.К. Выбор архитектуры вычислительной системы для обработки стереоизображений // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2024. Т. 8. № 1. С. 21-25.
3. Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications. Springer Nature, 2022.
4. Forsyth D.A., Ponce J. Computer vision: a modern approach. Prentice hall professional technical reference, 2002.
5. Kang S. B. et al. An active multibaseline stereo system with real-time image acquisition. Carnegie-Mellon University. Department of Computer Science, 1994. P. 1325-1334.
6. Stereo and Disparity | John Lambert [Электронный ресурс]. URL: <https://johnwlambert.github.io/stereo/>
7. Federal Telecommunications Standards Committee et al. Federal Standard 1037C: Glossary of Telecommunications Terms (FED-STD-1037C) //National Communications System Technology Program Office, Arlington, Virginia. 1996.
8. Image Alignment: Gray Scale Based Template Matching Algorithm: MAD, SAD, SSD, MSD, NCC, SSDA, SATD Algorithm [Электронный ресурс], URL: <https://blog.csdn.net/yyp1164868098/article/details/51464173>
9. Li J., Peng Y., Jiang T. Embedded real-time infrared and visible image fusion for UAV surveillance //Journal of Real-Time Image Processing. 2021. Vol. 18. No. 6. P. 2331-2345. DOI:10.1007/s11554-021-01111-0
10. Коваленко С.М., Платонова О.В., Казанцева Л.В. Архитектура устройств и систем вычислительной техники [Электронный ресурс]: Учебное пособие. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

Линьков Артем Кириллович

Аспирант каф. Вычислительной техники,
МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78,
Тел.: +7-910-437-74-23
Эл. почта: alinkov98@outlook.com

A.K. LINKOV

IMPLEMENTATION OF STEREO FRAME PROCESSING ALGORITHM USING FPGA

This paper studies the possibilities of parallel execution of depth map generation. The details of the algorithm for numerical determination of correspondences between fragments - SAD (Sum of absolute differences) based on pixel intensity are considered. Theoretical aspects of the internal structure of FPGAs, in particular Systems-on-Chip, are discussed. A general approach to the execution of algorithms on these systems is presented. The structure of a grid computing system utilizing massively parallel processing is proposed. The application possibilities of such systems are analyzed.

Keywords: Stereo image, depth map, matching cost, System-on-Chip, parallel computing, FPGA, grid structure.

REFERENCES

1. Klette R. Concise computer vision. Vol. 233. London: Springer. 2014.
2. Linkov A.K. Choice of computer system architecture for stereo images processing. *High-performance Computing Systems and Technologies*. 2024. Vol. 8. No. 1. P. 21-25 (in Russian).
3. Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications. Springer Nature. 2022.
4. Forsyth D.A., Ponce J. Computer vision: a modern approach. Prentice hall professional technical reference. 2002.
5. Kang S.B. et al. An active multibaseline stereo system with real-time image acquisition. Carnegie-Mellon University. Department of Computer Science. 1994.
6. Stereo and Disparity | John Lambert [Web resource]. URL: <https://johnwlambert.github.io/stereo/>
7. Federal Telecommunications Standards Committee. Federal Standard 1037C: Glossary of Telecommunications Terms (FED-STD-1037C). National Communications System Technology Program Office, Arlington, Virginia. 1996.
8. Image Alignment: Gray Scale Based Template Matching Algorithm: MAD, SAD, SSD, MSD, NCC, SSDA, SATD Algorithm [Web resource], URL: <https://blog.csdn.net/yyp1164868098/article/details/51464173>
9. Li J., Peng Y, Jiang T. Embedded real-time infrared and visible image fusion for UAV surveillance. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2021. P. 2331-2345.
10. Kovalenko S.M. et al. Architecture of computing devices and systems. Textbook for High Schools [CD-ROM]. Moscow. MIREA – Russian Technological University. 2021 (in Russian).

Artem K. Linkov

Graduate student of Department of Computing Techniques,
MIREA – Russian Technological University,
78, Vernadsky Avenue, Moscow, Russia, 119454
Phone: +7-910-437-74-23
E-mail: alinkov98@outlook.com

ПРИМЕР ОРГАНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ПЕН-ТЕСТИНГУ С ГИБРИДНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ СРЕДЫ

В данной статье рассматривается вариант применения гибридных виртуальных лабораторных сред для организации лабораторных практикумов по пен-тестингу в Институте цифровых технологий, электроники и физики Алтайского государственного университета. Продемонстрированы исключительные особенности виртуальных лабораторных сред и их сопряжения с реальным сетевым оборудованием и программно-аппаратными средствами защиты информации для создания эффективных моделей корпоративной инфраструктуры для проведения пен-тестинга. Отмечено, что применения ряда педагогических техник и методов позволяет сформировать действенные варианты реализации лабораторных практикумов, которые открывают широкие возможности для получения обучающимися новых знаний, умений и навыков. Внедрение командной работы и группового подхода к выполнению лабораторных работ позволяет трансформировать процесс обучения и включать в него элементы геймификации, что стимулирует учебную деятельность и получение новых знаний. Отмечена эффективность такого подхода для полноценного формирования требуемых современному специалисту по защите информации профессиональных компетенций.

Ключевые слова: виртуальная лабораторная среда, индивидуальная образовательная траектория, сетевая безопасность, защита информации, безопасность информационных систем, обучение кибербезопасности.

Введение

Процесс подготовки специалиста в области защиты информации является не только комплексным процессом получения большого объема теоретических и практических знаний, но и навыков работы как с актуальными программно-аппаратными решениями и комплексами, а также со сформированными и зарекомендовавшими себя методиками, и алгоритмами выстраивания практической деятельности такого специалиста по самым разным сценариям и в самых разных ситуациях. Формирование учебных полигонов для оттачивания таких действий уже неоднократно обсуждалось, и дискуссии резюмировались в пользу виртуальных лабораторных сред и виртуализованных лабораторных стендов как наиболее успешных по своим возможностям и соотношению «цена/эффективность» [1-5].

При подготовке специалистов по информационной безопасности (программа бакалавриата 10.03.01 и магистратуры 10.04.01, направления подготовки «Информационная безопасность») Институт цифровых технологий, электроники и физики (ИЦТЭФ) Алтайского государственного университета (АлтГУ) с 2020 года осуществляет активное применение виртуальных лабораторных сред [1-3]. Помимо общих возможностей по эффективному формированию учебных лабораторных стендов и полигонов для самых разных дисциплин направления подготовки, в [2] также отмечаются широкие возможности гибридизации виртуальных лабораторных схем и стендов с реальными сетевыми и специализированным программно-аппаратными средствами защиты информации для эффективного использования существующей материальной базы ИЦТЭФ. Таким образом, гибридное применение реальных и виртуализованных решений на базе лабораторной схемы в виртуальной лабораторной среде позволяет будущим специалистам формировать и совершенствовать умения по применению, управлению и анализу эффективности работы различных средств в смоделированных лабораторных сценариях их эксплуатации, близких к реальности.

Целый ряд дисциплин направлений подготовки «Информационная безопасность», такие как «Защита от вредоносного программного обеспечения», «Безопасность вычислительных сетей», «Безопасность операционных систем» и «Практикум по защите информационных систем» включают в себя как часть лабораторного практикума комплекс лабораторных работ, так или иначе связанных с такой важной и специфичной деятельностью, как «пен-тестинг», или «тестирование на проникновение». Под «пен-тестингом» обычно понимается проверка защищенности и поиск критичных уязвимостей корпоративной инфраструктуры и информационных систем (ИС), в ходе которых моделируется реальная атака условного нарушителя или хакера [6-8]. В ходе пен-тестинга его участники могут делиться на различные команды по ролям – например, «атакующие» и «защищающие» инфраструктурные объекты корпоративных систем, а также на «внутренних» и «внешних», в зависимости от того, активность какого из нарушителей имитируется в ходе тести-

рования. Само по себе тестирование на проникновение может выполняться как с позиции «белого ящика», когда про исследуемую систему пен-тестерам известна некоторая информация о ее устройстве и функционировании, так и с позиции «черного ящика», когда знания об исследуемой системе в начальный момент тестирования отсутствуют и добываются в ходе выполнения самого тестирования.

Своеобразие позиции пен-тестинга в рамках всего комплекса мер по защите информации обуславливает и специфичность методик обучения такому виду деятельности при подготовке специалистов по защите информации. В данной работе рассматриваются особенности формирования лабораторного практикума и использования различных подходов к обучению будущих специалистов с активным использованием гибридных виртуальных лабораторных сред, а также богатого опыта проведения соревнований по информационной безопасности «Capture The Flag» (CTF) в режиме «attack-defense» [9].

Эксплуатация гибридных виртуальных лабораторных сред и организация лабораторного практикума для цикла работ по пен-тестингу

На базе ИЦТЭФ лабораторные практикумы для подготовки специалистов по информационной безопасности организованы с использованием лабораторных сред “EVE-NG” (Emulated Virtual Environment – Next Generation) [10] и “PNETLAB” (Packet Network Emulator Tool Lab) [11]. Виртуальная среда “PNETLAB” поддерживает функциональность учебного центра (Learning Center) для обеспечения многопользовательского режима работы (множество студентов) и работы множества независимых сессий (отдельных схем и конфигураций лабораторных работ) одновременно. Основными серверными платформами для обслуживания виртуальных лабораторных сред являются производительные серверы DEPO Storm 3450E2 (2 x Intel Xeon Gold 6133 (20 ядер, 2.5 ГГц), 128 Гб RAM, 2 TB HDD) под управлением гипервизора VMWare ESXi версии 8.0.2 [12], на которых запускаются виртуальные серверные платформы среды “PNETLAB”. Виртуальная лабораторная среда “EVE-NG”, выполненная в виде готовой виртуальной машины, развертывается на отдельных рабочих станциях лабораторий и на индивидуальных рабочих станциях обучающихся (ПК, ноутбук).

В работе [2] уже обсуждались технические аспекты модификации исключительно виртуальных лабораторных сред в гибридные виртуальные лабораторные среды, а также способы объединения отдельных независимых виртуальных лабораторных сред в единый комплекс с сетевой связностью таких сред, безотносительно того, работают ли они на производительных серверных платформах лабораторий (“PNETLAB”) или же на отдельных рабочих станциях лабораторий (“EVE-NG”). Каждая платформа виртуальной лабораторной среды, помимо основного сетевого интерфейса, который используется для работы со средой и с лабораторными схемами, поддерживает дополнительные сетевые интерфейсы (до 10 интерфейсов). Эти дополнительные сетевые интерфейсы представлены на лабораторных схемах как «облака связи» (Cloud) и напрямую связаны с каждым дополнительным сетевым интерфейсом платформы виртуальной среды. Встроенный в гипервизор VMWare ESXi виртуальный Ethernet-коммутатор vSwitch позволяет объединить дополнительные сетевые интерфейсы серверной платформы виртуальной лабораторной среды “PNETLAB” с присвоением каждому сетевому интерфейсу уникального номера VLAN и связать их с реальным сетевым интерфейсом сервера DEPO Storm 3450E2 с последующей организацией транкового канала и передачей тегированных (маркированных) 802.1Q Ethernet-кадров на реальное сетевое оборудование лабораторий ИЦТЭФ [2]. Для отдельных рабочих станций, на которых эксплуатируются виртуальные среды “EVE-NG”, такое возможно путем добавления реальных сетевых адаптеров в конфигурацию рабочей станции с последующим соединением с сетевым оборудованием (Ethernet-коммутаторами) лабораторий ИЦТЭФ. Таким образом, используя возможности управляемых Ethernet-коммутаторов лабораторий ИЦТЭФ и возможности виртуальных Ethernet-коммутаторов vSwitch гипервизора VMWare ESXi, можно организовать как сопряжение с реальным сетевым оборудованием лабораторий и с реальными программно-аппаратными средствами защиты информации, так и обеспечить сетевую связность и обмен данными между независимыми виртуальными лабораторными схемами в рамках одной виртуальной лабораторной среды или между лабораторными схемами независимых виртуальных лабораторных сред “PNETLAB” и “EVE-NG”. Общая схема обеспечения работоспособности и функционирования приведена на рисунке 1.

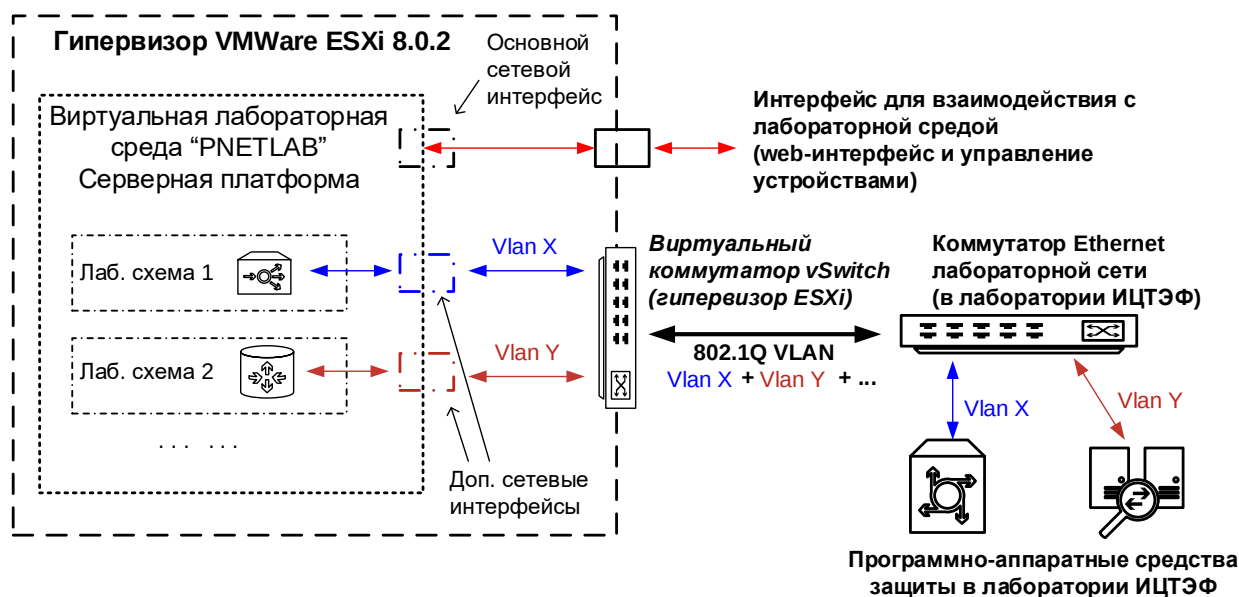


Рис. 1. Схема организации включения реальных сетевых устройств и программно-аппаратных средств защиты информации в лабораторные схемы и конфигурации виртуальной лабораторной среды [2]

Для лабораторных работ, ориентированных на задачи пен-тестинга, традиционным является формирование модельных лабораторных схем, которые включают в себя элементы корпоративной инфраструктуры и ИС (проверяемые в ходе пен-тестинга) и элементы рабочего окружения пен-тестера (его рабочие станции с необходимым инструментарием для проведения пен-тестинга). Моделируемые в лабораторных схемах элементы корпоративной инфраструктуры обычно содержат следующие компоненты:

- сетевое оборудование (Ethernet-коммутаторы и маршрутизаторы);
- корпоративная серверная инфраструктура (среды виртуализации, отдельные платформы под управлением различных серверных операционных систем (ОС), обычно Windows и Linux-подобные ОС);
- корпоративная пользовательская инфраструктура (рабочие станции под управлением различных ОС);
- различные программные и программно-аппаратные средства защиты информации (межсетевые экраны (МСЭ), средства обнаружения вторжений (СОВ), средства криптографической защиты информации (СКЗИ), антивирусные решения (САВЗ) и т.п.);
- средства сбора и обработки журнальной и мониторинговой информации, поступающей с корпоративной инфраструктуры, серверных платформ, рабочих станций и средств защиты информации.

Рабочая область пен-тестера, как правило, включает в себя несколько рабочих станций со специализированным набором прикладного программного обеспечения для проведения различных атак на тестируемую инфраструктуру. Как правило, основной платформой для рабочих станций пен-тестера выступает рабочая станция с ОС Linux (дистрибутив Kali Linux) [7-8].

Как уже было отмечено ранее, вариантов и сценариев проведения пен-тестирования к настоящему времени сформировано достаточно большое количество, среди которых следует выделить несколько классических подходов и алгоритмов действия [6]:

- 1) тестирование путем организации атакующих действий (Red Team);
- 2) тестирование путем обнаружения и анализа действий атакующего на стороне корпоративной инфраструктуры (Blue Team);
- 3) тестирование защищенности корпоративной инфраструктуры, находясь за пределами корпоративной инфраструктуры (внешнее пен-тестирование);
- 4) тестирование защищенности корпоративной инфраструктуры изнутри путем непосредственного подключения к корпоративной инфраструктуре (внутреннее пен-тестирование);

5) выполнение пен-тестирования при обладании предварительной информации об особенностях организации и работы корпоративной инфраструктуры (метод White-box);

6) выполнение пен-тестирования при отсутствии предварительной информации об особенностях организации и работы корпоративной инфраструктуры (метод Black-box).

Разнообразие доступных сценариев и алгоритмов действий пен-тестеров формирует определенные сложности при разработке отдельных лабораторных работ и целого лабораторного практикума в целом. В частности, необходимо подготовить сами элементы корпоративной инфраструктуры, которые будут моделировать реальные корпоративные среды и работающие в них ИС. Сюда необходимо включать как преднастроенные серверные и клиентские компоненты моделируемых ИС, так и сетевое оборудование, а также средства защиты информации, которые обычным образом встраиваются в корпоративную инфраструктуру для защиты информационного обмена в ней. Среди элементов корпоративной инфраструктуры могут присутствовать и «откровенно уязвимые» (vulnerable) компоненты в качестве некоторого индикатора эффективности или неэффективности работы развернутых в корпоративной среде средств защиты информации. Отдельные сценарии лабораторных работ могут предусматривать различные градации эффективности преднастроенных средств защиты информации (различную глубину настройки), чтобы сформировать у обучающихся понимание важности корректной настройки и эксплуатации применяемых средств защиты информации. Если сценарии лабораторной работы указывают на необходимость оперативного изучения и анализа журнальной и мониторинговой информации, поступающей от корпоративной инфраструктуры, то тут возможен вариант использования стороннего средства для сбора и анализа такой информации, либо подробное указание мест получения и анализа такой информации в каждой конкретной точке (на каждом элементе моделируемой корпоративной инфраструктуры). Кроме этого, отдельно в лабораторных работах необходимо указывать порядок работы пен-тестера, который использует свой инструментарий для выполнения атакующих действий, а также приводить ряд справочных примеров и пояснений по особенностям работы применяемого атакующим инструментария.

Все перечисленные аспекты указывают на то, что для классической лабораторной работы такой объем необходимой для ее выполнения учебной и методической информации, а также инструкций и задач, является многократно превышенным и невозможным для освоения одним студентом в отведенные для этого рабочими программами дисциплин учебными часами. Следовательно, представляется необходимым в ходе разработки такого лабораторного практикума заранее внести ряд изменений и перестроить формат работы обучающегося в ходе выполнения таких объемных лабораторных работ. В число обязательных пунктов необходимо включить следующие:

1) разделение объема лабораторной работы на задачи и работу пен-тестера и на задачи и работу для стороны модельной корпоративной инфраструктуры (группа работ для пен-тестеров Red Team и Blue Team) в отдельные лабораторные работы;

2) синхронизация лабораторных заданий отдельных лабораторных работ из предыдущего пункта в рамках единого цикла или объединяющей лабораторной работы с общей «легендой» и постановкой задания для отдельных лабораторных работ;

3) организацию групповой (2-3 обучающегося) и командной (в соответствии с группами задач) работы над заданиями лабораторных работ;

4) преобразование традиционных последовательных заданий лабораторной работы в проблемно-ориентированную задачу с выстраиванием алгоритма решения поставленной задачи до получения требуемого результата.

Предлагаемые изменения на организацию лабораторного практикума по пен-тестингу основываются на возможностях гибридных виртуальных лабораторных сред, которые позволяют обеспечить сетевую связность разрозненных независимых лабораторных сред воедино в соответствии с рассмотренными в [2] методами и принципами. Общая схема организации такого лабораторного практикума с разделением на отдельные группы задач и командную форму работы с использованием возможностей гибридных виртуальных лабораторных сред представлена на рисунке 2.

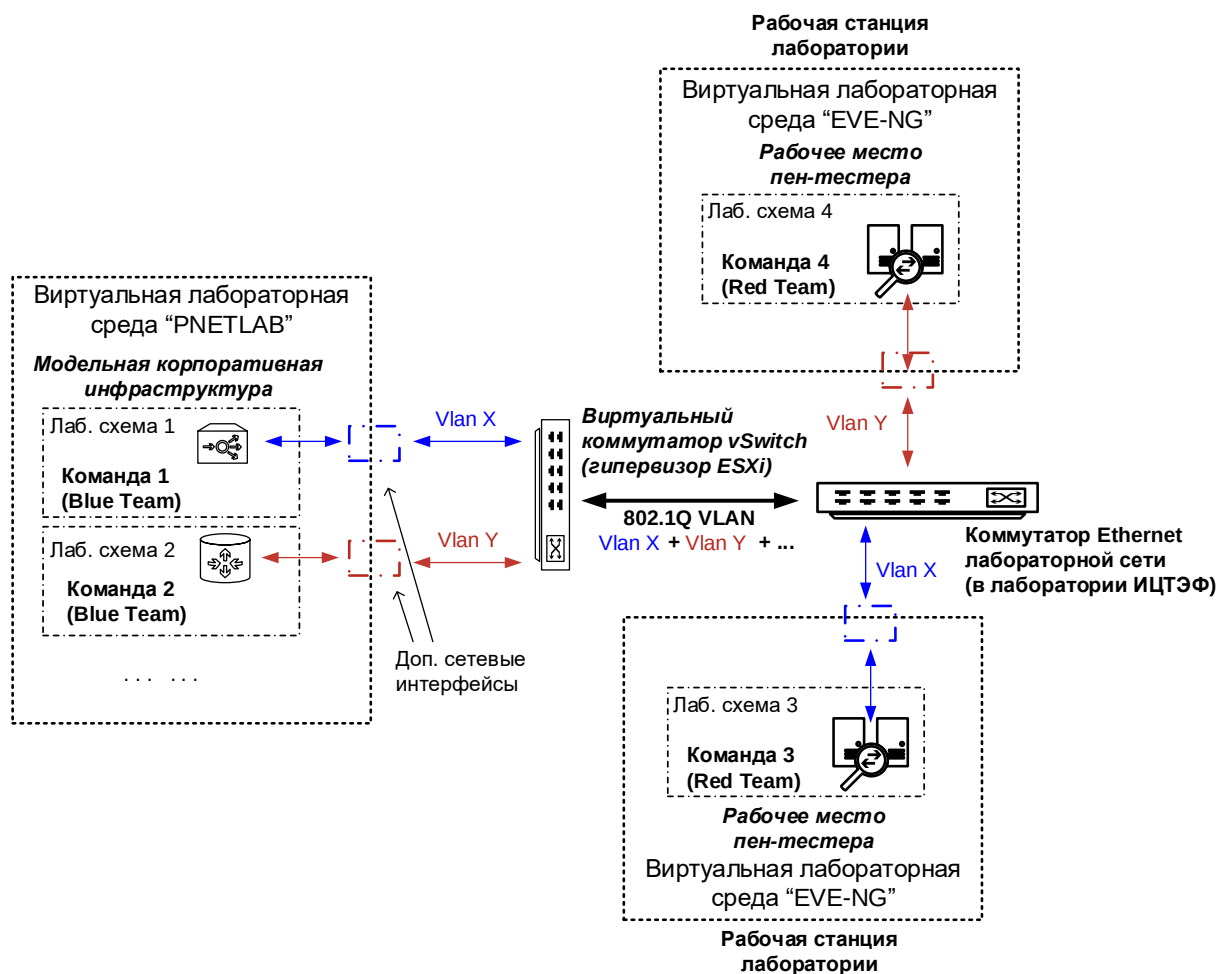


Рис. 2. Схема организации лабораторного практикума с использованием возможностей гибридных виртуальных лабораторных сред для командной работы над заданиями

В соответствии с представленной на рисунке 2 схематической конфигурацией, требуется обеспечить сетевую связность и обмен данными между отдельными лабораторными схемами, которые могут быть развернуты как на централизованной лабораторной виртуальной платформе "PNETLAB", так и на отдельно стоящих лабораторных рабочих станциях или индивидуальных устройствах обучающихся с виртуальной средой "EVE-NG". Сетевая связность двух отдельных лабораторных схем между собой дает возможность разделить сформированные в рамках общей проблемы задачи на две группы – например, задачи команды Red Team и задачи команды Blue Team, изолировать друг от друга рабочее окружение каждой из команд, обеспечить групповую работу нескольких обучающихся над одной и той же лабораторной схемой (для виртуальной лабораторной среды "PNETLAB"). Применение технологии 802.1Q VLAN позволяет секционировать и изолировать работу одной группы обучающихся из двух команд от другой аналогичной группы студентов, выполняющих тот же самый цикл лабораторных работ. Например, на рисунке 2 показано объединение двух виртуальных лабораторных схем для выполнения группой обучающихся в составе «Команда 1» и «Команда 3» («Команда 2» и «Команда 4», соответственно) лабораторных работ одного цикла независимо друг от друга. При этом лабораторная схема каждой из команд, работающих вместе, соответствует отдельным схемам отдельных лабораторных работ, ориентированных на свою собственную группу заданий и составляющих вместе единый цикл.

Предлагаемый формат организации и проведения лабораторных работ по пен-тестингу можно использовать для оптимизации учебного времени в нагрузке преподавателей путем одновременно задействования большего числа обучающихся для выполнения лабораторных работ. Наличие нескольких групп, разделенных на свои команды (Red и Blue, соответственно в каждой группе), дает возможность сформировать конкурентную учебную среду, в которой возможны реализации сценариев и стратегий проведения пен-тестинга в вариантах Black и White Box, внешнего и внутреннего пен-тестирования. В частности, вариант группового проведения лабораторного практику-

ма с использованием сценариев внешнего пен-тестинга в вариантах Black и White Box приведен на рисунке 3.

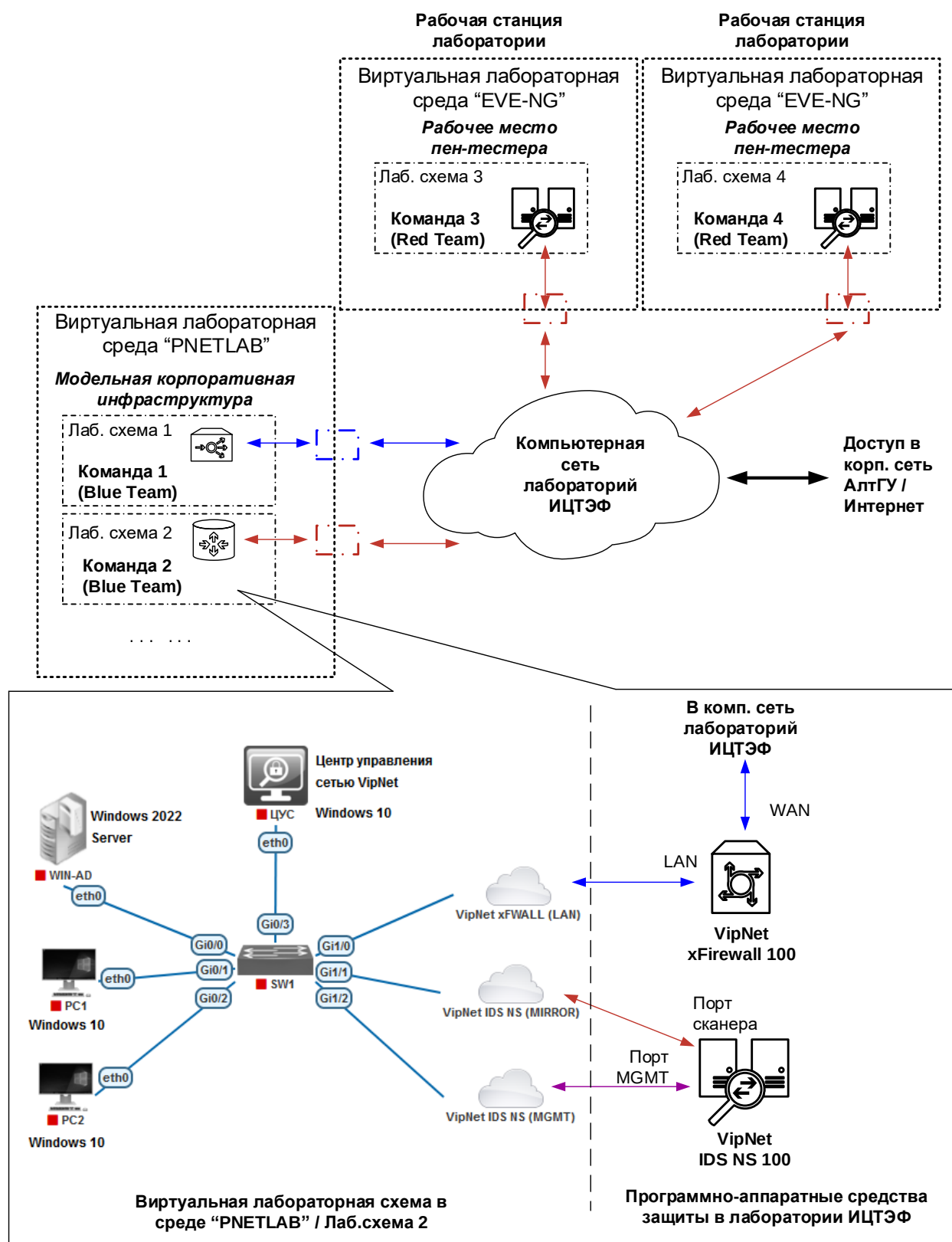


Рис. 3. Схема организации лабораторного практикума с привлечением большого числа участников и использованием разнообразных сценариев пен-тестинга

При предлагаемом на рисунке 3 подходе организация лабораторного практикума может подразумевать для ряда команд (например, Blue Teams) либо использование заранее подготовленных лабораторных схем, либо самостоятельное формирование лабораторных схем, моделирующих

корпоративную инфраструктуру. Возможности гибридной виртуальной лабораторной среды позволяют включать в формируемые виртуальные лабораторные схемы реальные программно-аппаратные средства защиты информации, а в случае формирования таких схем самостоятельно – перед обучающимися может быть открытым вопрос о формировании схемы для работы с Red-командами в открытом или закрытом режимах (White или Black Box). Например, на рисунке 3 показано, что «Команда 2» построила свою собственную схему корпоративной инфраструктуры, используя при этом внешние реальные средства защиты информации [13], которые были интегрированы в виртуальную лабораторную схему. Открытое декларирование своей инфраструктуры означает работу с «Командой 2» в режиме White Box, в отличие от лабораторной схемы «Команды 1», где никакой публичности для остальных участников не предполагается.

Дополнительно можно отметить, что при таком увеличении участников, сам процесс выполнения лабораторной работы и методика формирования заданий лабораторных работ плавно трансформируются и становятся похожими на вариант взаимодействия участников соревнований CTF в режиме “attack and defense”. Такой переход учебного процесса к варианту, близкому к способу взаимодействия участников процесса обучения в ходе соревнований CTF, имеет определенное количество своих преимуществ, которые отмечались в [9]. В частности, смещение формата проведения лабораторного практикума к формату CTF в режиме “attack and defense” дает возможность более открыто формировать лабораторные задания, позволяет обучающимся получать в параллельном режиме не только специфичные знания в области пен-тестирования, но и углублять и развивать свои навыки и умения в части администрирования операционных систем, скрипт-программированию на shell (Bash) и Python, а также использованию прикладного инструментария сетевого администратора, помимо особых навыков работы с проприетарными средствами защиты информации, используемыми в лабораторных схемах. Геймификация учебного процесса позволяет поддерживать интерес у обучающихся на всем протяжении освоения лабораторного практикума и стимулирует получение дополнительных новых знаний в основной и сопряженных областях предметного поля.

Заключение

В работе рассмотрен вариант внедрения и эксплуатации гибридных виртуальных лабораторных среды “PNETLAB” и “EVE-NG” в учебном процессе подготовки специалистов по информационной безопасности для организации лабораторного практикума по пен-тестингу. Предлагаемые гибридной виртуальной лабораторной средой функциональные возможности открывают широкие перспективы по развитию циклов лабораторных работ и их реорганизации с учетом множества индивидуальных учебных траекторий. Особенности формирования таких лабораторных циклов с учетом специфики пен-тестинга указывают на необходимость принятия особых мер и подходов при формировании циклов лабораторных работ, вплоть до выхода за традиционные рамки организации учебного процесса и перехода к организации лабораторного практикума в формате, близком к формату CTF-соревнований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мансуров А.В., Минакова Н.Н. Опыт успешного внедрения виртуальной лабораторной среды для лабораторных практикумов учебных дисциплин направления подготовки 10.03.01 Информационная безопасность // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2023. Т. 7. №1. С. 139-146.
2. Мансуров А.В., Минакова Н.Н. Успешная практика комбинирования лабораторных схем виртуальной лабораторной среды и реального лабораторного оборудования при подготовке специалистов по защите информации в АлтГУ // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2024. Т. 8. №1. С. 26-33.
3. Мансуров А.В., Минакова Н.Н., Рудер Д.Д., Ладыгин П.С. Опыт внедрения виртуальных лабораторных сред “PNETLAB” и “EVE-NG” для организации лабораторных практикумов при подготовке специалистов по защите информации в АлтГУ // Современное профессиональное образование. 2024. №1. С. 63-69.
4. Золотухин М.С., Кубанских О.В. Виртуальные лаборатории в преподавании и обучении // Современные научные исследования и инновации). 2019. № 7. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89984>
5. Mohtasin R., Prasad P. W.C., Alsadoon A., Zajko G., Elchouemi A., Singh A. K. Development of a virtualized networking lab using GNS3 and VMware workstation // 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India. 2016. P. 603-609. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566205.

6. Beheshti B.D., Shebli H.M.Z.A. A study on penetration testing process and tools // 2018 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), Farmingdale, NY, USA, 2018. P. 1-7. DOI: 10.1109/LISAT.2018.8378035.
7. Kumar S. Critical Analysis of Penetration Testing Process and Tools // EPRA International Journal of Research & Development (IJRD). 2021. Vol. 6. Issue 9. P. 228-235. DOI: 10.36713/epra2016.
8. Anand A., Kumar S., Rana R., Sakharkar A.N. A Comprehensive Review on Penetration Testing Tools with Emerging Technology // Proceedings of the KILBY 100 7th International Conference on Computing Sciences 2023 (ICCS 2023). DOI: 10.2139/ssrn.4488188.
9. Mansurov A. A CTF-Based Approach in Information Security Education: An Extracurricular Activity in Teaching Students at Altai State University, Russia // Modern Applied Science. 2016. Vol. 10. No. 11. P. 159-166. DOI: 10.5539/mas.v10n11p159.
10. EVE-NG. URL: <https://www.eve-ng.net/>
11. PNETLab: Lab is Simple. URL: <https://www.pnetlab.com/>
12. VMware ESXi. URL: <https://www.vmware.com/products/esxi-and-esx.html>
13. Продукция VipNet: программное и аппаратное обеспечение для защиты информации. URL: <https://infotecs.ru/products/>

Минакова Наталья Николаевна

Д-р физ.-мат. наук, профессор,
Профессор кафедры информационной безопасности
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
Тел.: +7-905-985-71-05
Эл. почта: minakova@phys.asu.ru

Мансуров Александр Валерьевич

Канд. техн. наук, доцент кафедры
информационной безопасности
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
Тел.: +7-903-910-81-73
Эл. почта: mansurov.alex@gmail.com

N.N. MINAKOVA, A.V. MANSUROV

AN EXAMPLE OF USING THE HYBRID VIRTUAL LAB ENVIRONMENT FOR PEN-TESTING LAB PRACTICUMS

This paper discusses the successful experience of using the hybrid virtual lab environments for pen-testing lab practicums at the Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics, Altai State University (Barnaul, Russia). It is shown that exceptional features of virtual lab environments combined with the real lab network and information security solutions and equipment help design effective models of corporate infrastructure for pen-testing purposes. A variety of specific pedagogical approaches and techniques allows one to produce unique and effective lab work schemas and plans to open broad prospective in obtaining new knowledge and skills in pen-testing. Introduction of teamwork, problem-oriented work, and gamification transform the educational process to stimulate the learning process and ability to analyze and think critically. The paper highlights the advantages of the proposed approaches to effectively enhance the learning of the competencies required for the successful future work of information security specialists.

Keywords: virtual lab environment, individual educational trajectory, network security, information security, information system security, cybersecurity education.

REFERENCES

1. Mansurov A.V., Minakova N.N. A Successful Experience of Deployment and Implementation of Virtual Lab Environment for Lab Practicums of 10.03.01 Information Security Degree Program. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2023. Vol. 7. Issue 1. P. 139-146 (in Russian)
2. Mansurov A.V., Minakova N.N. A Successful Experience of Combining Virtual Appliances and Real Equipment within the Lab Schemas of Virtual Lab Environments for Training of Information Security Specialists in Altai State University. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2024. Vol. 8. Issue 1. P. 26-33 (in Russian)
3. Mansurov A.V., Minakova N.N., Ruder D.D., Ladygin P.S. On Experience of Deployment and Implementation of the "PNETLAB" and "EVE-NG" Virtual Lab Environments for Training of Information Security Specialists in Altai State University. *Modern Professional Education*. 2024. Issue 1. P. 63-69 (in Russian)
4. Zolotukhin M.S., Rubanskiy O.V. Virtual Labs for Teaching Students. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2019. №7. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89984> (in Russian)
5. Mohtasin R., Prasad P.W.C., Alsadoon A., Zajko G., Elchouemi A., Singh A. K. Development of a virtualized networking lab using GNS3 and VMware workstation. *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India*. 2016. P. 603-609. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566205.
6. Beheshti B.D., Shebli H. M.Z.A. A study on penetration testing process and tools. *2018 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), Farmingdale, NY, USA*, 2018. P. 1-7. DOI: 10.1109/LISAT.2018.8378035.
7. Kumar S. Critical Analysis of Penetration Testing Process and Tools. *EPRA International Journal of Research & Development (IJRD)*. 2021. Vol. 6. Issue 9. P. 228-235. DOI: 10.36713/epra2016.

8. Anand A., Kumar S., Rana R., Sakharkar A.N. A Comprehensive Review on Penetration Testing Tools with Emerging Technology. *Proceedings of the KILBY 100 7th International Conference on Computing Sciences 2023 (ICCS 2023)*. DOI: 10.2139/ssrn.4488188.
9. Mansurov A. A CTF-Based Approach in Information Security Education: An Extracurricular Activity in Teaching Students at Altai State University, Russia. *Modern Applied Science*. 2016. Vol. 10. No. 11. P. 159-166. DOI: 10.5539/mas.v10n11p159.
10. EVE-NG. URL: <https://www.eve-ng.net/>
11. PNETLab: Lab is Simple. URL: <https://www.pnetlab.com/>
12. VMWare ESXi. URL: <https://www.vmware.com/products/esxi-and-esx.html>
13. VipNet Solutions: Software and Hardware for Information Security. URL: <https://infotecs.ru/products/>

Natalya N. Minakova

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,
Department of Information Security
Altai State University,
61, Lenina ave., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7-905-985-71-05,
E-mail: minakova@phys.asu.ru

Alexander V. Mansurov

PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Security
Altai State University,
61, Lenina ave., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7-903-910-81-73,
E-mail: mansurov.alex@gmail.com

МНОГОПОТОЧНАЯ МИКРОАРХИТЕКТУРА RISC-V – УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ

В данной статье рассматривается многопоточный вариант открытой процессорной архитектуры RISC-V. В предложенной реализации микроархитектуры контексты потоков сохраняются в наборах т.н. теневых регистров, отображаемых в момент выполнения потока на регистры общего назначения x0-x31 и программный счетчик (PC). Предлагаемая концепция управления потоками выполнения предназначена, прежде всего, для софт-процессоров, и для систем с одним уровнем привилегий – машинным – уровнем микроконтроллерных встраиваемых систем. Все потоки предполагаются равноправными и работающими в едином адресном пространстве. Защита данных потоков и контроль за доступом к общим переменным выносятся на уровень программного обеспечения. Рассмотрение ведётся для минимального набора инструкций I+Zicsr (целочисленные операции плюс работа с регистрами специального назначения (CSR)). Для управления и настройки параметров потоков предлагается задействовать набор CSR-регистров.

Ключевые слова: RISC-V, софт-процессоры, IP-ядра, многопоточность, управление, прототипирование.

Введение

Разработка многопоточной микроархитектуры софт-процессора актуальна для систем на базе FPGA по следующим причинам:

- упрощение обработки множества асинхронных событий за счет нескольких потоков без необходимости программного переключения контекста;
- упрощение контроллера прерываний;
- упрощение программного кода и уменьшение его размера.

Одной из задач работы была задача сохранить совместимость многопоточной микроархитектуры с архитектурой RISC-V [1, 2].

В спецификации архитектуры RISC-V заявлена поддержка многопоточности в виде т. н. аппаратно-поддерживаемых потоков – хартов (hart) [3]. Собственно, это и было реализовано в рассматриваемой микроархитектуре. Для каждого из потоков(хартов) предусмотрено хранение состояния потока в массиве теневых регистров (основные регистры x0-x31 и счетчик программ) – каждый набор регистров хранит архитектурное состояние потока.

Общими ресурсами являются исполнительные логические блоки (периферийные устройства, АЛУ), память (программ и данных). Также общими для всех потоков является блок регистров специального назначения (CSR) – регистры состояния, таймеры, счетчики производительности и т.п.

Многопоточная микроархитектура

Основные микроархитектурные блоки многопоточного варианта процессора представлены ниже.

Наборы теневых регистров:

rv_reg_file – файл-регистр (массив из нескольких файл-регистров);

rv_pc – программный счетчик (массив из нескольких регистров);

rv_mem – блок памяти (программная и оперативная).

Общие для потоков логические блоки:

rv_desh – дешифратор команд (слова-инструкции) с входом «сброса конвейера»;

rv_imm – формирователь непосредственного значения из слова-инструкции;

rv_ops_mux – коммутатор операндов для АЛУ;

rv_cmp – формирователь сигнала разрешения перехода;

rv_alu_v – АЛУ;

rv_rez_mux – коммутатор результатов;

rv_csr – блок регистров специального назначения.

Неархитектурные регистры:

rv_r_reg – регистры хранения результатов промежуточных этапов.

Регистры специального назначения:

rv_hart_reg – регистры хранения номеров и состояния активности хартов;

rv_timer – системный таймер.

Для управления наборами теневых регистров вводится группа регистров – hart-reg, объединенных в линейку. Выходные сигналы этих регистров – номер харта и бит активности харта. При сбросе регистры инициализируются нулями и биты активности хартов сброшены.

На линейку регистров hart-reg в процессе функционирования подается последовательность хартов с кодами активности. Сама последовательность потоков хранится в отдельной небольшой памяти – hart_table. Hart_table адресуется циклическим счетчиком.

Роль циклического счетчика играют младшие разряды системного таймера.

Биты активности харта также используются для управления записью в такие модули процессорного ядра, как программный счетчик, файл-регистр, запись в память (если харт не активен – запись не будет произведена).

Перечень потоков хранится в модуле **rv_hart_table** – память хранения списка и состояния хартов.

Управление аппаратными потоками в архитектуре RISC-V

По спецификации архитектуры RISC-V и данным открытых источников, управление аппаратными потоками выносится за рамки архитектуры. В большинстве реализаций управление потоками выносится на уровень прикладного или системного программного обеспечения (в зависимости от типа и назначения процессора) [4, 5].

Специфицированы только несколько регистров специального назначения (регистры, приведенные ниже соответствуют машинному уровню доступа, для систем с различным уровнем привилегий эти регистры также отображаются на адреса доступные непривилегированному коду):

mhartid (только чтение) – Hart ID Register – идентификатор аппаратного потока, который выполняет текущий код (для однопоточных процессоров mhartid = 0);

mstatus (чтение/запись) – Machine Status Register – регистр содержит текущее состояние и управляет текущим состоянием аппаратного потока.

Однако, ни в одном из этих регистров механизмы прямого управления состоянием потока (выполняется/не выполняется) не предусмотрены, по крайней мере для ядер микроконтроллерного класса.

Способы взаимодействия потоком между собой также будут зависеть от конкретной реализации, и, как правило, взаимодействия потоков регулируются средствами операционных систем.

Возможные способы взаимодействия потоков в системах с одним аппаратным уровнем привилегий:

- через общую память (часто для исключения гонок по данным/переменным, вероятно, лучше задействовать команды А-расширения системы команд, при его поддержке), иначе контроль выносится на программный уровень;

- через прерывания/исключения;

- через регистры специального назначения (CSR-регистры) – подобный вариант не встречался, но, формально, не запрещен в микроархитектурных реализациях.

Варианты перехода потока между активным и пассивным состояниями.

Программные (синхронные) события:

- самостоятельно (поток имеет возможность перевести самого себя в состояние “не активен” – например, изменяя переменную, бит в выделенном CSR-регистре);

- по команде другого потока (аналогично, или через общую переменную, или через бит CSR-регистра);

Асинхронные события — реакция на:

- по событию периферийных устройств – таймеры, счётчики, приемопередающие устройства (UART, SPI, I2C, I2S и тп.);

- по событиям обмена данными между потоками (чтение/запись).

Фактически, задача сводится к созданию некоторого подобия контроллера прерываний, которая упрощается тем, что можно следовать соглашениям, что за обработку тех или иных событий будет отвечать строго определенный аппаратный поток.

Помимо признака активности, поток характеризуется значением программного счетчика – т.е. тем кодом, который поток призван исполнять. Значениями программных счетчиков потоков также можно управлять – через адресное пространство памяти, или через CSR-регистры.

Стратегически правильнее будет вынести функции управления потоками на уровень CSR-регистров – в вариантах архитектуры с поддержкой привилегированных команд доступ к ним чаще всего ограничивается средствами операционных систем/системных мониторов [6].

Для максимального исключения конфликтов с существующими реализациями и расширениями системы команд в качестве базовых адресов CSR-регистров используют “дальние адреса” – например, 0x3800 и далее.

Таблица

Регистры управления hart-ами

Адрес	Обозначение	Описание
0x3800 - ...	Hart_table	Таблица потоков, находящихся в “жесткой ротации” – те наборы теневого регистров, выполнение которых разрешено или планируется в ходе работы – задаёт порядок выполнения потоков. Текущий поток отображается также в регистре текущего потока (hartid) (младшая часть), бит активности потока отображается в регистре состояния потока (hart_state)
0x3820 - ...	PC_table	Таблица значений программных счетчиков потоков в “жесткой ротации”
0x3840 - ...	Sensitivity_list	Набор битовых полей, показывающих как/посредством чего поток может изменять свой бит активности

Биты слов в полях Sensitivity_list кодируют возможные для потока условия изменения его состояния:

- поток управляет своим состоянием сам;
- поток чувствителен к состоянию и сигналам системных и периферийных устройств - таймеры, интерфейсы;
- поток реагирует на уровни линий ввода-вывода.

Заключение

Все потоки предполагаются равноправными и работающими в едином адресном пространстве. Защита данных потоков и контроль за доступом к общим переменным потоков выносятся на уровень программного обеспечения. Предлагаемый вариант управления потоками требует лишь минимального набора инструкций I+Zicsr (целочисленные операции плюс работа с регистрами специального назначения (CSR), и не конфликтует с устоявшимися стандартами и расширениями архитектуры RISC-V.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The RISC-V Instruction Set Manual. Volume I: User-Level ISA Document Version 2.2. Editors: Andrew Waterman, Krste Asanov. 2017.
2. Computer architecture - What is a hardware thread in RISC-V - Electrical Engineering Stack Exchange [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://electronics.stackexchange.com/questions/580645/what-is-a-hardware-thread-in-risc-v>
3. Trusted Hart for Mobile RISC-V Security [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/trustcom/2022/942500b587/1LFM9tik1IQ>
4. RISC-V Assembly Language Programmer Manual Part I developed by: SHAKTI Development Team @ iitm '20 shakti.org.in RISC-V Green Card_v. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/1617/ECAD+Arch/files/docs/RISCVGreenCardv8-20151013.pdf>
5. Stephen Smith. Programming in the RISC-V assembly language / translated from English by A. V. Logunov; edited by A. Yu. Romanov. M.: DMK Press, 2024. 276 p.
6. Adding custom instructions compilation support, to RISCV toolchain. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://medium.com/@viveksgt/adding-custom-instructions-compilation-support-to-riscv-toolchain-78ce1b6efcf4>

Калачев Александр Викторович

К.ф.-м.н., доцент каф. Вычислительной техники
и электроники,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
Тел.: +7-913-027-84-06
Эл. почта: kalachev@phys.asu.ru

A.V. KALACHEV

RISC-V MULTITHREADED MICROARCHITECTURE – FLOW CONTROL

This article discusses a multithreaded version of the RISC-V open processor architecture. In the proposed implementation of the microarchitecture, thread contexts are stored in sets of so-called shadow registers, mapped at the time of thread execution to general-purpose registers x0-x31 and a program counter (PC). The proposed concept of execution flow control is intended primarily for soft processors, and for systems with one privilege level - the machine level – the level of microcontroller embedded systems. All threads are assumed to be equal and working in a single address space. Data flow protection and control over access to shared variables is placed at the software level. The review is conducted for the minimum set of instructions I+Zicsr (integer operations plus work with special-purpose registers (CSRs)). It is proposed to use a set of CSR registers to control and configure the flow parameters.

Keywords: RISC-V, soft processors, IP cores, multithreading, management, prototyping.

REFERENCES

1. The RISC-V Instruction Set Manual. Volume I: User-Level ISA Document Version 2.2. *Editors: Andrew Waterman, Krste Asanov.* 2017.
2. Computer architecture - What is a hardware thread in RISC-V - Electrical Engineering Stack Exchange. <https://electronics.stackexchange.com/questions/580645/what-is-a-hardware-thread-in-risc-v>
3. Trusted Hart for Mobile RISC-V Security. <https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/trustcom/2022/942500b587/1LFM9tik1IQ>
4. RISC-V Assembly Language Programmer Manual Part I developed by: SHAKTI Development Team @ iitm '20 shakti.org.in RISC-V Green Card_v. <https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/1617/ECAD+Arch/files/docs/RISCVGreenCardv8-20151013.pdf>
5. Stephen Smith. Programming in the RISC-V assembly language / translated from English by A. V. Logunov; edited by A. Yu. Romanov. Moscow. DMK Press. 2024. 276 p.
6. Adding custom instructions compilation support, to RISCV toolchain. <https://medium.com/@viveksgt/adding-custom-instructions-compilation-support-to-riscv-toolchain-78ce1b6efcf4>

Alexander V. Kalachev

PhD of Physics and Mathematics, Assistant Professor,
Department of Computing Techniques and Electronics
Altai State University
61, Lenina ave., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7-913-027-84-06
E-mail: kalachev@phys.asu.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ

Статья посвящена вопросам верификации специализированных вычислительных систем, разрабатываемых с использованием программируемой логики. Основное внимание уделено построению комплексной верификационной инфраструктуры, охватывающей все этапы проектирования — от системного моделирования до макетирования аппаратных прототипов. Раскрываются особенности проверки архитектурных решений на системном уровне, в частности с применением подхода моделирования на уровне транзакций, позволяющих проводить верификацию на ранней стадии без необходимости полной реализации логической схемы. Приводится анализ методов верификации на уровне регистровых передач (RTL), включая создание тестовых окружений, моделирование вычислительной логики и использование формальных методов. Отдельное внимание уделяется этапу макетирования с применением аппаратных средств, основу составляет прототипирование на базе ПЛИС и применение методики Hardware-in-the-Loop. В совокупности решение задачи о проектировании окружения для сквозной верификации специализированных вычислителей может играть существенную роль в налаживании обратных связей между этапами маршрута проектирования, в свою очередь снижая проектные риски и достигая соответствия проектируемой архитектуры целевым требованиям.

Ключевые слова: специализированные вычислители, верификация, системный уровень, RTL, TLM 2.0, формальные методы, прототипирование, Hardware-in-the-Loop, ПЛИС, тестовое окружение.

Введение

Проектирование специализированных вычислителей требует особого внимания к верификации на всех этапах разработки. В отличие от универсальных архитектур, специализированные решения ориентированы на выполнение конкретных задач и характеризуются высокой плотностью логики, специфическими интерфейсами, что предъявляет повышенные требования к проверке функциональной и временной корректности.

По данным зарубежных исследований, затраты времени на этапы верификации могут достигать 70% общего времени проектирования цифровых систем [1]. Для специализированных вычислителей эта доля может быть еще выше в связи с необходимостью создания индивидуальных моделей поведения и специфических тестовых окружений. Ошибки, допущенные на ранних этапах проектирования, но не выявленные своевременно, на поздних стадиях ведут к существенному увеличению трудоемкости отладки, особенно при реализации на уровне аппаратной логики.

Дополнительную сложность представляет формализация функциональных требований. Архитектура специализированных вычислителей часто проектируется согласно принципу, описываемому термином “ad-hoc” (разработка ведется с учетом конкретных требований), без привязки к стандартным шаблонам поведения, что затрудняет автоматизированную генерацию тестов и требует применения комбинированных методик, сочетающих имитационное моделирование, эмуляцию и формальные методы. Высокий уровень параллелизма и использование пользовательских асинхронных интерфейсов также усложняют воспроизводимость ошибок и требуют применения комплексного временного анализа.

Вследствие описанных причин верификация специализированных вычислителей является неотъемлемым компонентом всего проектного процесса и необходима на всех этапах создания специализированного вычислителя.

Этапы верификации для специализированных вычислителей

Верификация специализированных вычислителей требует многоуровневого подхода, который включает в себя проверку на разных этапах разработки: от системного уровня до макетирования, что соответствует сквозному маршруту проектирования вычислителей (см. ниже рис.), при этом являясь связующим звеном для распространения связей как в прямую, так и в обратную стороны. Эти этапы верификации помогают не только обеспечить функциональную корректность устройства, но и проверить его производительность, временные характеристики, а также соответствие физическим ограничениям.



Рис. Сквозной маршрут проектирования специализированных вычислителей

Системный уровень верификации является отправной точкой для проверки корректности архитектурных решений. На этом этапе основное внимание уделяется выявлению поведенческих и архитектурных несоответствий, которые в дальнейшем могут привести к критическим ошибкам. Используемое здесь функциональное моделирование предполагает абстрагирование от физической реализации и сосредоточение на логике взаимодействия компонентов, что позволяет проводить верификацию архитектурных решений без необходимости ранней детализации на уровне логических элементов.

Для проведения системного моделирования и верификации в индустрии широко используются такие инструменты, как Cadence Xcelium, Synopsys VCS, а также Mentor Questa Advanced Simulator. Эти программные комплексы поддерживают смешанное моделирование, позволяют интегрировать тестовые сценарии с архитектурными моделями, проводить раннюю отладку и создавать автоматизированные регрессионные тесты. Особенно важной в этом контексте является поддержка TLM 2.0 (Transaction-Level Modeling), который позволяет моделировать взаимодействие компонентов через транзакции вместо сигналов. Это обеспечивает как ускоренную симуляцию, так и возможность более гибкого проектирования архитектурных связей.

Методология TLM 2.0 предполагает построение иерархически организованной среды, включающей модели внешнего окружения, тестовые стимулы, модули анализа откликов и средства мониторинга [2]. В контексте системной верификации особенно важно, что вся коммуникация между компонентами реализуется через транзакции, а не через физические сигналы. Это позволяет сохранять абстракцию, ускорять симуляцию и адаптировать тестовые сценарии под различные аппаратные реализации без необходимости их полной переработки. Верификационные компоненты, реализованные в терминах транзакционных взаимодействий, могут быть легко параметризованы, настраиваемы под различные архитектуры и повторно использованы в смежных проектах, что критично в условиях быстро меняющихся требований или кратких сроков разработки.

Одним из эффективных решений в области быстрой архитектурной верификации на основе TLM является программный комплекс Platform Architect от Synopsys, предоставляющий разработчику инструменты для построения транзакционных моделей и анализа их производительности [3]. Аналогичные возможности предлагает Cadence Virtual System Platform, позволяющая эмулировать программно-аппаратные взаимодействия, включая запуск встроенного программного обеспечения [4]. Дополнительно верификационные задачи на системном уровне эффективно решаются с использованием высокопроизводительного симулятора Imperas OVPsim, который предназначен для моделирования встроенных процессоров и позволяет проводить проверку архитектурных решений до этапа реализации RTL.

Таким образом, системный уровень предоставляет уникальные возможности для анализа архитектурных компромиссов. Благодаря возможности имитации поведения вычислительной системы до её физической реализации, разработчик получает доступ к результатам измерения латентности, пропускной способности, профилей загрузки каналов и обработки потоков данных, что де-

ляет системную верификацию не только инструментом проверки корректности, но и важным аналитическим этапом оптимизации проектных решений.

Переход от системного моделирования к более детальному описанию аппаратной логики требует реализации верификационных процедур на уровне RTL, где формируется конечное описание функциональной реализации вычислителя в виде регистров, логических элементов и мультиплексоров, и т.д. В отличие от системного уровня, где рассматривается общая функциональная модель, верификация на уровне RTL предполагает детальную проверку логических переходов и синхронизации сигналов, что является критически важным для предотвращения потери данных.

В частности, если рассматривать специализированные вычислители с конвейерной архитектурой, как одной из актуальных современных архитектур, основное внимание в рамках верификации на уровне RTL уделяется проверке правильности описания работы регистров и мультиплексоров, отвечающих за реализацию конвейерной логики. Необходимость тщательного контроля возникает из-за того, что каждая вычислительная стадия должна корректно принимать, обрабатывать и передавать данные следующей стадии без возникновения ошибок синхронизации. Возможные временные отклонения или задержки в логических путях могут привести к нарушениям, проявляющимся в виде «data hazards» и «control hazards», что существенно снижает надежность системы [5]. В этой связи применяются методы анализа временных характеристик, позволяющие определить допустимые интервалы для каждого логического элемента и обеспечить синхронизацию работы всех стадий конвейера.

На практике для верификации на уровне RTL широко используются такие инструменты, как ModelSim и Vivado Simulator, позволяющие моделировать множество вариантов работы системы при различных входных условиях. Дополнительно, применение специализированных тестовых окружений (testbenches) обеспечивает комплексный анализ работы специализированного вычислителя, позволяя отследить корректное функционирование системы при изменении нагрузки или возникновении внешних помех. При этом анализ покрытия (coverage analysis) играет важную роль, так как она обеспечивает полный охват проверяемых состояний системы и помогает выявить неучтенные сценарии работы вычислителя, что является ключевым моментом для предотвращения возможных ошибок в синхронизации.

Особое внимание уделяется также применению методов формальной верификации, таких как bounded model checking, реализуемых посредством инструментов Symbiosys и Jasper Gold. Эти методы позволяют провести глубокий анализ логики без необходимости проведения полной симуляции всех вариантов функционирования системы, что не только ускоряет процесс верификации, но и повышает вероятность обнаружения критичных ошибок на уровне регистровых переходов. Совокупность описанных методов и инструментальных средств обеспечивает необходимую точность и надежность проверки вычислителя, создавая прочную базу для дальнейшей реализации и физического макетирования на последующих этапах разработки.

Верификация на уровне RTL является ключевым этапом, где осуществляется преобразование высокоуровневых моделей в детализированное описание аппаратной логики, требующее тщательного анализа временных характеристик, синхронизации и корректности логических операций. Этот этап не только минимизирует риск возникновения ошибок при последующей физической реализации, но и служит критически важным звеном в обеспечении общей надежности специализированного вычислителя.

Переходя к этапу макетирования, можно отметить, что он представляет собой завершающую фазу верификации перед переходом к физической реализации проекта, что особенно актуально для специализированных вычислителей. На данном этапе проводится проверка работы проектируемой системы в условиях, максимально приближенных к реальным, с целью выявления тех проблем, которые могли остаться незамеченными при проведении симуляций на системном уровне и уровне регистровых передач. Фокус верификации смещается на оценку функционирования в условиях реального оборудования, где возникают дополнительные физические ограничения, такие как задержки, метастабильность и погрешности, вызванные не оптимальным расположением логических элементов.

При реализации верификации на этапе макетирования широко используется подход Hardware-in-the-Loop (HIL), позволяющий интегрировать проект с физическими компонентами и оценить его работу в условиях реального взаимодействия. В данной методике применяется прототипирование на базе FPGA, а также встраиваемые (embedded) системы, что обеспечивает возможность проведения тестов с использованием стандартных протоколов, таких как UART или SPI, для

контроля передачи данных между различными частями системы [6]. Использование НЛ позволяет не только проверить корректность работы логических блоков, но и оценить временные характеристики системы в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Верификация на этапе макетирования включает в себя детальный анализ синхронизации внутренних компонентов вычислителя, а также оценку влияния физических параметров, таких как потребляемая мощность и площадь кристалла, на общую производительность системы. Для специализированных вычислителей, которые характеризуются высокой степенью параллелизма и последовательной обработкой данных, критически важна проверка временной точности передачи сигналов. Небольшие отклонения в синхронизации могут привести к временным сбоям или даже вызвать метастабильное состояние, что негативно отражается на общей надежности системы [7], [8]. Рассматривая все это, можно отметить, что окончательное тестирование на этапе макетирования направлено на выявление и корректировку подобных ошибок, что является неотъемлемой частью подготовки проекта к серийному производству [9].

Кроме того, важной задачей данного этапа является анализ экономической эффективности реализации – оценка площади, занимаемой логикой, и энергопотребления устройства. Именно в этой фазе можно получить объективную оценку соответствия параметров физической реализации заранее заданным требованиям, что позволяет принять решение о завершении проектного цикла или необходимости проведения дополнительных корректировок. Применение комплексных методов верификации на этапе макетирования позволяет снизить риски появления критических ошибок на финальном этапе эксплуатации устройства и обеспечить высокую надежность и стабильность работы вычислителя в реальных условиях.

Заключение

Таким образом, особенности специализированных вычислителей — такие, как ориентация на конкретные задачи и индивидуальные архитектурные решения, предъявляют особые требования к организации верификационного процесса. Как следствие, верификация не может рассматриваться как изолированный этап, завершенный на одной из стадий, а должна обладать свойством непрерывности и соответствовать сквозному маршруту проектирования, что в свою очередь позволяет поддерживать целостность архитектурных решений, снижая риск появления несогласованностей между уровнями, что в свою очередь, обеспечивает раннее выявление потенциальных проблем ещё до перехода к дорогостоящей стадии физической реализации и дает возможность не накапливать грядущие ошибки, что значительно сокращает трудозатраты и теоретически может повысить надежность конечного решения. Это особенно важно в условиях ограниченных сроков разработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хаханов В.И., Каминская М.А., Зайченко С.А. Верификация цифровых устройств на основе использования анализа тестопригодности и ассерционных библиотек // АСУ и приборы автоматики. 2007. №140. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-tsifrovyyh-ustroystv-na-osnove-ispolzovaniya-analiza-testoprigo-dnosti-i-assertsionnyh-bibliotek> (дата обращения: 17.04.2025).
2. Yeh T.C., Lin Z.Y. and Chiang M.C. Enabling TLM-2.0 interface on QEMU and SystemC-based virtual platform // 2011 IEEE International Conference on IC Design & Technology, Kaohsiung, Taiwan, 2011, P. 1-4. doi: 10.1109/ICICDT.2011.5783207.
3. Bombieri, Nicola & Fummi, Franco & Pravadelli, Graziano & Marques-Silva, Joao. Towards equivalence checking between TLM and RTL models. 2007. P. 113-122. Doi: 10.1109/MEMCOD.2007.371236.
4. Mir A.A. & Balakrishnan S. & Tahar S. Modeling and verification of embedded systems using Cadence SMV. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2000. Vol. 1. No. 1. P. 179-183. 10.1109/CCECE.2000.849694.
5. Tan Qinhan & Yang Yuheng & Bourgeat Thomas & Malik Sharad & Yan Mengjia. RTL Verification for Secure Speculation Using Contract Shadow Logic. 2024. 10.48550/arXiv.2407.12232.
6. Тарасов И.Е., Люлява Д.В., Дуксин Н.А., Дуксина И.И. Применение стандартных интерфейсов персональных компьютеров для интеграции вычислительных устройств в программно-аппаратных комплексах // ИТ-Стандарт. 2025. № 1(42). С. 77-80.
7. Nohl A., Schirrmeister F., Taussig D. Application specific processor design architectures, design methods and tools // Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design. IEEE Press, 2010. P. 349-352.
8. Jari Nurmi. Processor Design: System-On-Chip Computing for ASICs and FPGAs (1st. ed.). Springer Publishing Company, Incorporated. 2007.

9. Abdollahi Meisam & Yeganli Faegheh & Baharloo Mohammad & Baniasadi Amirali. Hardware Design and Verification with Large Language Models: A Literature Survey, Challenges, and Open Issues. 2024. Doi: 10.20944/preprints202411.0156.v1.

Дуксина Илона Ильинична

Магистрант, ассистент кафедры ВТ,
МИРЭА - Российский Технологический Университет,
119454, Россия, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (499) 600-80-80,
Эл. почта: duksina@mirea.ru

I.I. DUKSINA

VERIFICATION OF SPECIALIZED COMPUTATORS

This article addresses the verification of specialized computational systems developed using programmable logic, designed to perform strictly defined tasks within massively parallel or streaming architectures. The main focus is on the creation of a comprehensive verification infrastructure covering all stages of the design process — from system modeling to hardware prototype emulation. The article highlights the specifics of verifying architectural decisions at the system level using SystemC and TLM 2.0 methodologies, enabling early-stage verification without the need for full logical schematic implementation. It provides an analysis of verification methods at the Register Transfer Level (RTL), including testbench creation, pipeline logic modeling, and the use of formal methods. Special attention is given to the prototyping stage using hardware resources, including FPGA-based prototyping and the Hardware-in-the-Loop methodology. Overall, the presented approach demonstrates the effectiveness of end-to-end verification of specialized computators, reduced design risks, and alignment of the designed architecture with target requirements.

Keywords: specialized computators; verification; system level; RTL; SystemC; TLM 2.0; formal methods; prototyping; Hardware-in-the-Loop; FPGA; testbench.

REFERENCES

1. Khakhanov V.I., Kaminskaya M.A., Zaychenko S.A. Verification of Digital Devices Based on Testability Analysis and Assertion Libraries. *ACS and Automation Devices*. 2007. No. 140. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-tsifrovyyh-ustroystv-na-osnove-ispolzovaniya-analiza-testoprignosti-i-assertsionnyh-bibliotek> (accessed: 17.04.2025) (in Russian)
2. Yeh T.C., Lin Z.Y. and Chiang M.C. Enabling TLM-2.0 Interface on QEMU and SystemC-Based Virtual Platform. In: *2011 IEEE International Conference on IC Design & Technology, Kaohsiung, Taiwan*, 2011, P. 1–4. doi: 10.1109/ICICDT.2011.5783207.
3. Bombieri Nicola, Fummi Franco, Pravadelli Graziano, Marques-Silva Joao. Towards Equivalence Checking Between TLM and RTL Models. In: *Proceedings of MEMOCODE*. 2007, P. 113–122. doi: 10.1109/MEMCOD.2007.371236.
4. Mir A.A., Balakrishnan S., Tahar S. Modeling and Verification of Embedded Systems Using Cadence SMV. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2000. Vol. 1. P. 179–183. doi: 10.1109/CCECE.2000.849694.
5. Tan Qinhan, Yang Yuheng, Bourgeat Thomas, Malik Sharad, Yan Mengjia. RTL Verification for Secure Speculation Using Contract Shadow Logic. 2024. doi: 10.48550/arXiv.2407.12232.
6. Tarasov I.E., Lyulyava D.V., Duksin N.A., Duksina I.I. Application of Standard PC Interfaces for Integration of Computing Devices in Hardware-Software Complexes. *IT-Standard*. 2025. No. 1(42). P. 77–80.
7. Nohl A., Schirrmeister F., Taussig D. Application-Specific Processor Design: Architectures, Design Methods, and Tools. In: *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design*. IEEE Press, 2010. P. 349–352.
8. Jari Nurmi. Processor Design: System-On-Chip Computing for ASICs and FPGAs. 1st ed. Springer Publishing Company. 2007.
9. Abdollahi Meisam, Yeganli Faegheh, Baharloo Mohammad, Baniasadi Amirali. Hardware Design and Verification with Large Language Models: A Literature Survey, Challenges, and Open Issues. 2024. doi: 10.20944/preprints202411.0156.v1.

Ilona I. Duksina

Master student, Computer Engineering Department,
MIREA – Russian Technological University,
78, Vernadsky ave., Moscow, Russia, 119454
Phone: +7 (499) 600-80-80, E-mail: duksina@mirea.ru

УПРАВЛЕНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ КЛАСТЕРНОЙ СИСТЕМОЙ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ

В данной статье рассматриваются актуальные вопросы проектирования современных систем цифровой обработки информации, с особым акцентом на использование кластерных архитектур на базе программируемой логики. Особое внимание уделено вопросам организации управляющего ядра, необходимого для эффективного функционирования реконфигурируемой кластерной системы. Рассматриваются основные функциональные задачи, возлагаемые на управляющую систему, включая координацию взаимодействия между кластерными узлами, динамическую конфигурацию аппаратных ресурсов и обеспечение адаптивности системы к изменяющимся условиям вычислений. Произведён сравнительный анализ различных архитектурных решений при построении управляющего ядра, основанных как на жёсткой, так и на программируемой логике. Обоснована целесообразность использования специализированного программного процессора (софт-процессора) в качестве управляющего ядра, учитывая его гибкость, расширяемость и оптимальное соотношение между производительностью и потреблением ресурсов. Приводятся критерии выбора архитектуры такого процессора, а также предлагается оригинальный вариант его реализации, ориентированный на специфические требования реконфигурируемых систем. В заключительной части статьи представлена экспериментальная оценка предложенного решения, демонстрирующая его практическую применимость для решения задач управления в рамках кластерной системы.

Ключевые слова: *массово-параллельные вычислительные системы, кластерные вычислители, ПЛИС, RTL, системы класса MISD, частичная реконфигурация, программируемые вычислители.*

Современные тенденции в области цифровой обработки данных всё чаще требуют от вычислительных систем высокой степени гибкости, масштабируемости и адаптивности к изменяющимся условиям эксплуатации. Особенно остро эта потребность проявляется в контексте потоковой обработки данных в реальном времени, где ключевую роль играют такие параметры, как параллелизм и возможность быстрой подстройки системы под конкретные задачи.

Из-за возрастающих требований к скорости обработки, массово-параллельные специализированные вычислители [1, с. 56] становятся ключевым элементом вычислительных систем обработки данных. Такие системы ориентированы на выполнение большого числа однотипных задач, что актуально для современных направлений исследований и разработок, таких как обработка больших данных, моделирование процессов и пр. При этом рост размеров схемы как следствие попыток ускорения работы системы ставит архитектурные задачи проектирования для соответствия не только требованиям производительности, но и учёту физических аспектов. Так при проектировании системы можно столкнуться с трудностями как со стороны обеспечения соответствия требованиям при моделировании на схемотехническом уровне, так и с вопросами распределения выполняемых задач в рамках самого вычислителя. Таким образом, можно говорить об актуальности формирования архитектурного подхода к проектированию массово-параллельных систем.

Архитектура реконфигурируемой кластерной системы программируемой логики

Разбиение всей системы на отдельные, чётко выделенные кластеры представляет собой эффективный подход к организации вычислительной архитектуры. Такой подход позволяет существенно упростить процесс управления конфигурационными и эксплуатационными параметрами всей системы в целом, за счёт локализации задач и ограниченного круга зависимостей внутри каждого кластера. Это, в свою очередь, способствует повышению гибкости системы, поскольку становится возможным индивидуально настраивать и масштабировать кластеры в зависимости от требований конкретных задач, не затрагивая всю систему целиком.

Кроме того, совокупность кластеров, функционирующих независимо и параллельно друг с другом, способствует потенциальному росту общей производительности системы. Параллелизм обработки данных особенно важен в контексте высокопроизводительных систем, ориентированных на потоковую обработку больших объёмов информации в реальном времени. Такая организация работы позволяет более эффективно использовать ресурсы и минимизировать временные задержки, связанные с последовательной обработкой.

Кластерная архитектура также играет ключевую роль в обеспечении масштабируемости. Благодаря модульности, система может быть расширена за счёт добавления новых кластеров без необходимости значительных изменений в уже существующей структуре. Это особенно актуально

при проектировании систем, которые должны адаптироваться к растущим вычислительным нагрузкам и изменяющимся условиям эксплуатации.

С точки зрения схемотехнического проектирования, наличие чёткой иерархии, а также логического разграничения компонентов на одном иерархическом уровне даёт значительные преимущества. В частности, это упрощает размещение элементов системы на кристалле при проектировании интегральной схемы. Разделение на повторяющиеся структурные блоки помимо прочего способствует унификации проектных решений.

Каждый кластер включает в себя набор программируемых вычислителей, предназначенных для выполнения специфических задач, стоящих перед системой. Такие вычислители обладают возможностью исполнять индивидуальные программы, что позволяет параллельно обрабатывать единый поток входных данных с использованием различных алгоритмов. Эта особенность соответствует архитектурной модели MISD (Multiple Instruction, Single Data) [2, с. 463] в классификации Флинна, и обеспечивает высокую степень адаптивности вычислительного процесса. Благодаря программируемости вычислителей, можно оперативно изменять их поведение и алгоритмы обработки данных, подстраивая систему под новые условия или задачи без необходимости внесения изменений в аппаратную часть.

Общая структурная схема системы представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структурная схема кластерной системы

В центральной части выделено ядро, которое выполняет управляющие функции, координирует обработку данных и определяет методы и последовательность их обработки. Ядро системы играет роль управляющего центра, обеспечивая взаимодействие между кластерами, контроль за исполнением программ, а также реализацию глобальной логики обработки информации. Благодаря такому подходу достигается высокая степень управляемости и синхронизации в работе всей вычислительной системы.

Задачи управляющего ядра системы

Конкретный перечень задач, входящих в обязанности управляющего ядра, может быть сформирован только на основе технического задания на разработку всей системы. Однако, даже на этапе архитектурного проектирования можно выделить ряд типичных функций, которые будут в том или ином виде решаться таким ядром. В частности, поскольку кластерная система подразумевает, как реконфигурируемая, то подобная операция так или иначе затронет управляющее ядро. Для реконфигурации кластера потребуется отключение работающего кластера, выделение области под новый его вариант и непосредственно загрузка конфигурации. Такие действия потребуют контроль над доставкой данных к кластеру, а также оценки возможности проведения обозначенных изменений. Аналогичная ситуация складывается и со стороны процесса изменения программы, выполняемой на конкретном процессоре кластера.

Обеспечение взаимодействия с оператором, осуществляющим внесение изменений, также требует действий со стороны управляющего ядра. Кроме непосредственного чтения и записи данных с учётом используемых интерфейсов, такое взаимодействие потребует формирование данных о состоянии системы.

Таким образом, даже при вариативности реализации, ядро всегда выступает связующим и управляющим элементом, определяющим как стабильность функционирования всей архитектуры, так и её способность к адаптации и расширению.

Описание управляющего ядра системы

Управляющее ядро должно обеспечивать централизованное управление работой всей кластерной вычислительной структуры, что требует высокой степени адаптивности и возможности реализации разнообразных управляющих алгоритмов, которые могут изменяться или дополняться в процессе эксплуатации. В таком ключе использование жёсткой логики приводит к необходимости борьбы со сложностями, такими как: реализация адаптивных алгоритмов (включая перенастройку кластеров), строгое требование к перестроению HDL-описания [3, с. 200] при любом внесении изменений, а соответственно, и необходимость ресинтеза всей системы в целом, и многое другое.

Процессорная архитектура [4, с. 72] в свою очередь обладает необходимой гибкостью, столь требуемой при проектировании управляющего ядра. В таком случае в качестве ядра может выступать процессор общего назначения [5, с. 439]. Универсальность такого варианта значительно повышает гибкость и адаптируемость системы, однако, имеет ряд существенных недостатков. Очевидная избыточность функционала по отношению к описанным задачам управления: высокая вычислительная мощность, поддержка виртуальной памяти [6, с. 351], сложные кэш-системы [7, с. 123] и конвейерные архитектуры не востребованы в рамках управляющей логики. Помимо этого, нельзя не отметить повышенные требования к аппаратным ресурсам: к минусам в виде значительное потребление энергии, сложность интеграции и необходимость инфраструктуры, можно добавить существенную площадь, занимаемую от общей площади кристалла, в случае если речь идёт о soft-процессорах [8, с. 27].

Наиболее рациональным решением в рамках проектирования данной системы является создание собственного специализированного программного процессора (soft-процессора), реализованного в логике ПЛИС. Такой подход позволяет точно соответствовать архитектуре требованиям конкретной системы и сочетает преимущества гибкости и аппаратной оптимальности:

1. Минимальный и целевой набор команд, который строго соответствует задачам управления.
2. Оптимизация под конкретные аппаратные интерфейсы и компоненты: возможность реализации специальных инструкций для управления кластером, доступа к внутренним регистрам, обмена с периферией и т. д.
3. Компактность и управляемость: простая архитектура с жёстко заданным исполнением инструкций позволяет легко обеспечить детерминированное выполнение, что критично для систем с жесткими временными ограничениями.
4. Расширяемость: возможность добавления пользовательских инструкций или модулей со-процессоров для ускорения типовых операций.
5. Легкость отладки и верификации: софт-процессор полностью контролируем в HDL-описании, прозрачен на всех этапах тестирования и может быть снабжен встроенными средствами трассировки и мониторинга.
6. По сравнению с жёсткой логикой требует меньшее число итераций изменения HDL-описания, за счет возможности к изменению программы, что сокращает общее время отладки.

Сформированный набор команд позволяет использовать архитектурный приём «bypass» [9, с. 833] (рис. 2), что существенно упрощает проектирование. В таком варианте организации выход памяти команд выступает в роли регистра команд, в зависимости от которого производится та или иная операция. Разумеется, в сравнении с конвейерными или последовательными многостадийными вариантами организации такой процессор будет уступать им в показателе максимальной тактовой частоты, однако, поскольку процессор является управляющим, иными словами вспомогательным, а основной поток данных направляется непосредственно на ускорители в виде кластеров, высокая частотность его работы не является необходимым условием функционирования системы в целом.

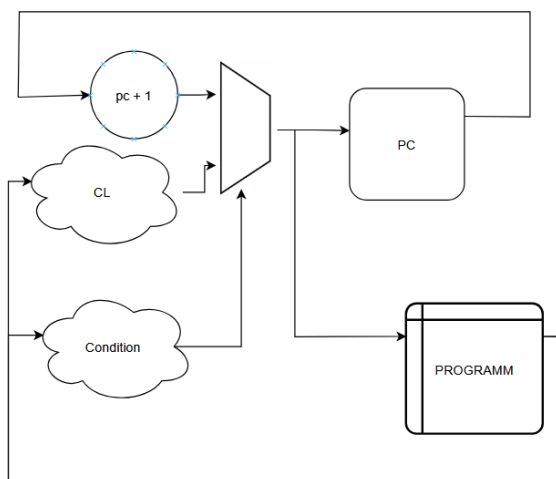


Рис. 2. Схема применения приёма «bypass»

Реконфигурация областей кристалла задействует технологию частичной реконфигурации, в свою очередь непосредственная загрузка частичной конфигурации осуществляется с использованием *ісар* интерфейса. Для отладки и взаимодействия с оператором применяется протокол UART [10, с. 80] в силу простоты реализации самой логики и отсутствие необходимости высокоскоростного интерфейса. Управление кластерами учитывает интерфейс, разработанный для самих кластеров (рис. 3).

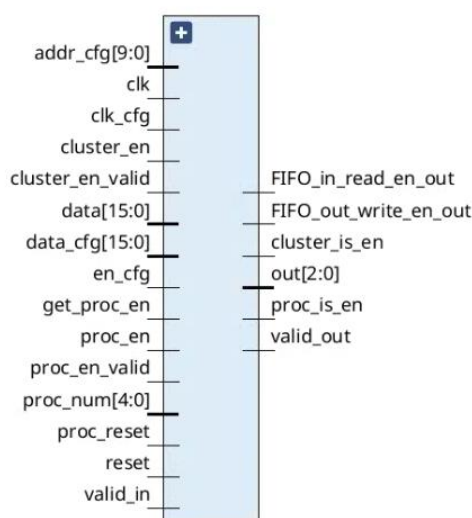


Рис. 3. Интерфейс кластера системы

Управление конкретным программируемым вычислителем в рамках кластера задействует одновременно комбинацию сигналов на шинах: передачи номера вычислителя и шину включения и отключения, шину передачи данных о конфигурации или программы в зависимости от конкретной цели обращения к устройству. Перепрограммирование самого управляющего процессора осуществляет внешний по отношению к ядру модуль, разрешение на перезапись которому выдаёт сам процессор, исполняя введенную команду.

Реализация управляющей системы

Для основы макета использовалась отладочная плата на базе ПЛИС семейства Artix седьмой серии. В демонстрационных целях в систему были добавлены 5 кластеров, которые заняли соответствующее количество тактовых регионов из восьми, доступных на кристалле. Под управляющее ядро также был отведён отдельный тактовый регион. Со стороны пользователя использовалось разработанное ПО для общения с применением протокола UART. Результаты демонстрации работы представлены на рисунке 4. Наличие ответов, содержащих «ОК», повествует о корректно-

сти выполнения команд, в свою очередь сообщение с символом «I» свидетельствуют о переходе к режиму интерпретатора самого процессорного ядра.

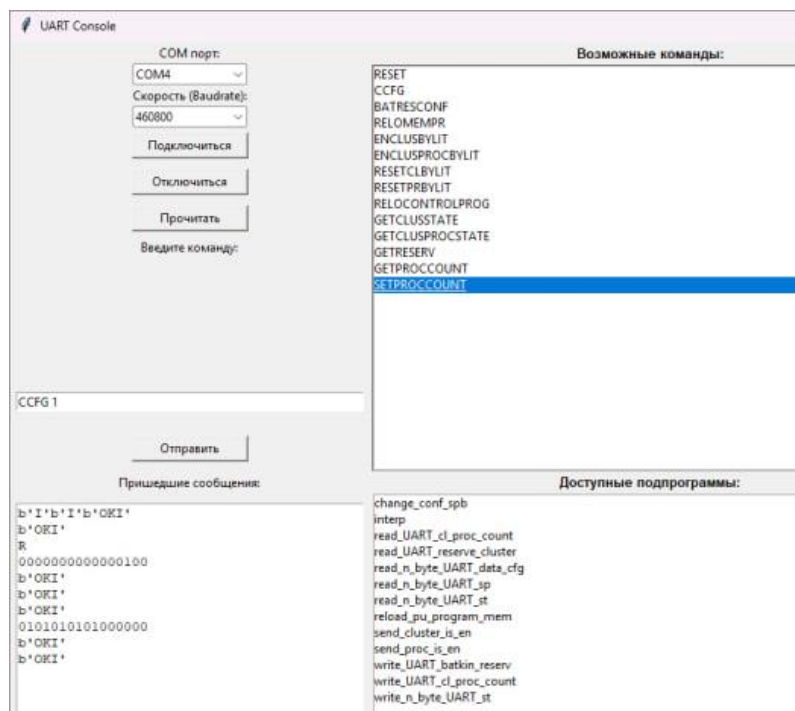


Рис. 4. Результаты демонстрации работы управляющей системы

Заключение

Таким образом, предложен подход к организации управляющего ядра для кластерной системы программируемой логики, обоснована процессорная архитектура, а также преимущества применения специализированного процессорного ядра для решения таких задач по сравнению с жёсткой логикой или использованием процессоров общего назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hennessy J.L.; Patterson D.A. A new golden age for computer architecture: Domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development. In Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), Los Angeles, CA, USA, 1–6 June 2018. doi:10.1109/ISCA.2018.00011.
2. Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2024. 688 с.: ил.
3. Тарасов И.Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. 2019 г. 538 стр.
4. Тарасов И.Е. Архитектура процессоров в составе гетерогенной системы на кристалле для встраиваемых применений // ИТ-Стандарт. 2022. № 1(30). С. 71-76. EDN FPKLSS.
5. Harris Sarah and Harris David. Digital Design and Computer Architecture: ARM Edition (1st. ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2015.
6. Nohl A., Schirmermeister F., Taussig D. Application specific processor design architectures, design methods and tools // Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design. IEEE Press, 2010. P. 349-352.
7. Jari Nurmi. Processor Design: System-On-Chip Computing for ASICs and FPGAs (1st. ed.). Springer Publishing Company, Incorporated. 2007.
8. Тарасов И.Е., Потехин Д.С., Платонова О. В. Перспективы применения софт-процессоров в системах на кристалле на базе программируемых логических интегральных схем // Russian Technological Journal. 2022. Т. 10, № 3. С. 24-33.
9. John L. Hennessy, David A. Patterson. Computer Architecture. 6th Edition. A Quantitative Approach. (The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design), 2017. 936 p.
10. Тарасов И.Е., Люлява Д.В., Дуксин Н. А., Дуксина И.И. Применение стандартных интерфейсов персональных компьютеров для интеграции вычислительных устройств в программно-аппаратных комплексах // ИТ-Стандарт. 2025. № 1(42). С. 77-81.

Дуксин Никита Александрович

Аспирант, преподаватель кафедры ВТ,
МИРЭА - Российский Технологический Университет,
119454, Россия, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (499) 600-80-80,
Эл. почта: duksin@mirea.ru

N.A. DUKSIN

CONTROL OF RECONFIGURABLE CLUSTER PROGRAMMABLE LOGIC SYSTEM

This article addresses current issues in the design of modern digital information processing systems, with a particular focus on the use of cluster architectures based on programmable logic. Special attention is given to the organization of the control core, which is essential for the effective operation of a reconfigurable cluster system. The main functional tasks assigned to the control system are discussed, including coordination of interactions between cluster nodes, dynamic configuration of hardware resources, and ensuring the system's adaptability to changing computational conditions. A comparative analysis of various architectural solutions for building the control core is presented, covering both fixed and programmable logic approaches. The feasibility of using a specialized software processor (soft processor) as the control core is substantiated, considering its flexibility, scalability, and optimal balance between performance and resource consumption. The article outlines the criteria for selecting the architecture of such a processor and proposes an original implementation tailored to the specific requirements of reconfigurable systems. The concluding section presents an experimental evaluation of the proposed solution, demonstrating its practical applicability for control tasks within a cluster system.

Keywords: massively parallel computing systems, cluster computers, FPGA, RTL, MISD class systems, partial re-configuration, programmable computing units.

REFERENCES

1. Hennessy J.L.; Patterson D.A. A new golden age for computer architecture: Domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development. In *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, Los Angeles, CA, USA, 1–6 June 2018. doi:10.1109/ISCA.2018.00011.
2. Orlov S.A. Organizatsiya EVM i sistem: Uchebnik dlya vuzov. 4-e izd. SPb.: Piter, 2024. 688 p. (in Russian)
3. Tarasov I.E. PLIS Xilinx. Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya. 2019. 538 p. (in Russian)
4. Tarasov I.E. Arhitektura processorov v sostave geterogennoj sistemy na kristalle dlya vstraivaemyh primenenij. *IT-Standart*. 2022. № 1(30). P. 71-76. EDN FPKLSS (in Russian)
5. Harris Sarah and Harris David. Digital Design and Computer Architecture: ARM Edition (1st. ed.). *Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA*. 2015.
6. Nohl A., Schirrmeister F., Taussig D. Application specific processor design architectures, design methods and tools. *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design*. IEEE Press. 2010. P. 349-352.
7. Jari Nurmi. Processor Design: System-On-Chip Computing for ASICs and FPGAs (1st. ed.). *Springer Publishing Company, Incorporated*. 2007.
8. Tarasov I.E., Potekhin D.S., Platonova O.V. Perspektivy primeneniya soft-processorov v sistemah na kristalle na baze programiruemyh logicheskikh integral'nyh skhem. *Russian Technological Journal*. 2022. Vol. 10, No. 3. P. 24-33. (in Russian)
9. Hennessy John L., Patterson David A. Computer Architecture. 6th Edition. *A Quantitative Approach. (The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design)*. 2017. 936 p.
10. Tarasov I.E., Lyulyava D.V., Duxsin N.A., Duxsina I.I. Primenenie standartnyh interfejsov personal'nyh komp'yutеров dlya integratsii vychislitel'nyh ustrojstv v programmno-apparatnyh kompleksah. *IT-Standart*. 2025. № 1(42). P. 77-81 (in Russian)

Nikita A. Duxsin

Post-graduate student, Computer Engineering Department,
MMIREA – Russian Technological University,
78, Vernadsky ave., Moscow, Russia, 119454
Phone: +7 (499) 600-80-80,
E-mail: duksin@mirea.ru

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЛОГИКИ ПО СТАДИЯМ КОНВЕЙЕРНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ С УЧЁТОМ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ

В статье освещается ряд вопросов, связанных с оценкой выходных характеристик конвейерного вычислителя, в частности, оценки равномерности распределения вычислительной логики по стадиям вычислений. Описываются основные варианты представлений конвейерного вычислителя, рассматривается применение методики совместного проектирования для построения конечного схемотехнического решения, в частности, использование высокоуровневого синтезатора для разбиения тракта обработки данных с учётом технических сведений о целевой аппаратной платформе. Отдельно описывается принцип балансировки стадий вычислений со стороны синтезатора для соблюдения заданных временных ограничений. Также в статье рассматривается вопрос расхождения оценок для логического и физического вариантов представлений, описываются возможные причины возникновения расхождений, приводится обоснование необходимости подходов к оценке сбалансированности конечного решения. В рамках статьи предлагается производить оценку равномерности распределения величин задержек на путях распространения сигнала на основе начальных моментов генеральной совокупности. В практической части статьи продемонстрировано применение предлагаемого подхода для нескольких вариантов решений, на примере которых отражено влияние топологии расположения стадий вычислений на сбалансированность решения, а также акцентировано внимание на наличие ограничений при использовании статистических показателей для оценки распределения.

Ключевые слова: ПЛИС, HDL, RTL, специализированный вычислитель, конвейерная архитектура, маршрут проектирования, Positive Slack, Slack-гистограмма.

Введение

Процесс разработки специализированных вычислителей сопровождается созданием различных вариантов представлений устройства с разной степенью абстракции. По мере приближения разрабатываемых моделей устройства к конечному решению основной задачей выступает сохранение характеристик, заложенных на первоначальном этапе системного моделирования.

В соответствии с методикой совместного проектирования специализированных вычислителей [1, с. 40], разработанной в лаборатории специализированных вычислительных систем РТУ МИРЭА (рис. 1), конечное решение формируется путём последовательного построения моделей на системном уровне, на уровне регистровых передач и на уровне топологии с применением инструментальных средств целевой аппаратной платформы. В рамках соответствующего маршрута определены два основных вида представлений специализированного вычислителя: логическое и физическое.



Рис. 1. Маршрут построения конечного решения в рамках методики совместного проектирования специализированных вычислителей

Логическое представление отражает функциональные свойства вычислительного устройства, а также структуру и взаимосвязи его внутренних компонентов. За построение логического представления вычислителя отвечает специализированный синтезатор [2, с. 6], который на основе заданной системной модели, реализованной с применением языков программирования высокого уровня, способен сформировать логическое представление вычислителя на языке описания аппаратуры (Verilog, VHDL, SystemVerilog) [3, с. 14]. В свою очередь физическое представление учитывает размещение компонентов на кристалле аппаратной платформы, а также трассировку соединительных линий между ними. Для формирования физического представления используются системы автоматизированного проектирования (САПР) [4, с. 200], в рамках которых выполняется маршрут построения конечного решения для целевой аппаратной платформы, в качестве которой могут выступать программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) или сверхбольшие интегральные схемы (СБИС).

Предварительная оценка на этапе логического представления

На основе технических сведений о компонентах целевой аппаратной платформы синтезатор может производить предварительную оценку выходных характеристик конечного решения. Исходя из полученных результатов оценивания синтезатор строит логическое представление вычислителя в соответствии с заданным набором требований, в число которых может входить тактовая частота работы вычислителя, выделяемая статическая и динамическая мощность и т.д. Применительно к специализированным вычислителям с конвейерной архитектурой [5, с. 86] соответствие тем или иным требованиям, предъявляемым к выходным характеристикам, достигается за счёт изменения внутренней структуры и конфигурации параметров стадий вычислений.

В частности, для соблюдения временных ограничений [6, с. 165] в процессе построения логического представления на стороне синтезатора производится балансировка стадий вычислений, представляющая собой равномерное распределение вычислительной нагрузки между всеми стадиями конвейерного вычислителя с целью уравнивания величин критических задержек распространения сигнала (рис. 2). Равномерность разбиения достигается за счёт использования знаний об исходных величинах задержек для атомарных операций вычислений, рассчитанных в соответствии с техническими сведениями о целевой аппаратной платформе. Применение балансировки способствует сокращению длины критического пути по величине логической задержки (logic delay [6, с. 179]), в результате чего увеличивается предельное значение тактовой частоты работы вычислителя.

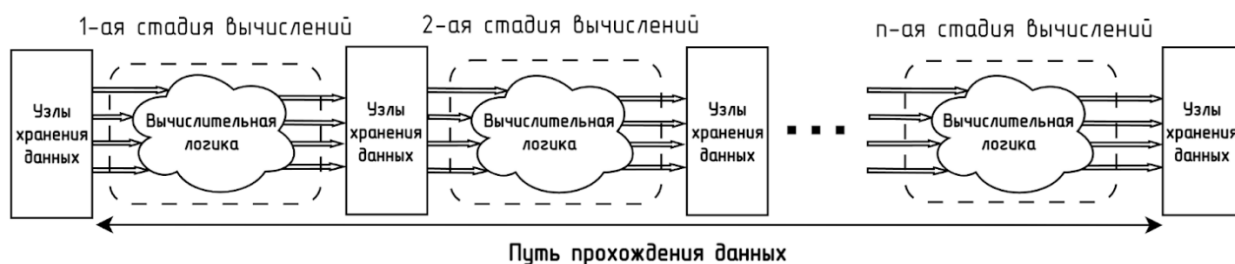


Рис. 2. Структурная схема разбиения вычислительной логики на стадии вычислений

При переходе к физическому представлению сохранение равномерности распределения задержек между стадиями зависит от множества различных факторов. Возможно возникновение ситуации, при которой предварительная оценка может иметь расхождения с выходными характеристиками, рассчитанными для физического представления встроенными средствами САПР. Причины расхождений могут быть связаны с несовершенством алгоритмов разбиения, в частности, использованием некорректных данных о задержках на атомарных операциях, возможными внутренними изменениями компонентного состава в процессе синтеза решения, особенностями целевой аппаратной платформы и т.д.

Рассматривая вопрос с точки зрения построения физического представления, можно отметить, что процессы размещения и трассировки, лежащие в основе переноса синтезированной схемы решения на кристалл аппаратной платформы, как правило, производятся на основе алгоритмов глобальной оптимизации, в частности, алгоритме имитации отжига [7, с. 796]. В результате размещения компонентов схемы вычислителя на кристалле итоговая топология расположения стадий вычислений может не соответствовать первоначально определённой структуре (рис. 3), что в свою

очередь может также выступать одной из причин расхождения оценок для разных вариантов представлений вычислителя. Поскольку применение данных алгоритмов носит эвристический характер [7, с. 797], прогнозирование величин задержек, возникающих в процессе трассировки (route delay [6, с. 171]), на более ранних этапах проектирования не представляется возможным.

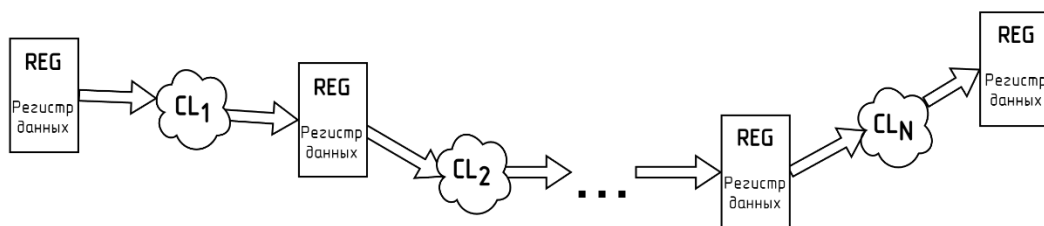


Рис. 3. Структурного схема физического представления специализированного вычислителя

Исходя из вышесказанного, возникает необходимость в оценке сбалансированности конечного решения с целью выявления возникших расхождений между вариантами представлений вычислителя и сужения области поиска причин расхождения.

Подход к оценке решения на этапе физического представления

Анализ временных характеристик конечного решения, как правило, производится на основе показателя Slack [8, с. 73], определяющего запас времени прохождения данных на синхронном пути распространения сигнала. Основным назначением показателя Slack является оценка возможности работы конечного решения при заданных временных ограничениях.

Идеальный случай подразумевает наличие одинакового минимального возможного запаса по времени для каждой из стадий вычислений, другими словами, задержка распространения сигнала на всех синхронных путях схемы эквивалентна заданному временному ограничению. Однако, как правило, если в ходе построения физического представления был получен вариант конечного решения, у которого величины всех задержек распределены в положительной области значений (positive slack), дальнейшее рассмотрение вопроса улучшения характеристик решения не производится. Исходя из этого, в рамках настоящей статьи предлагается производить оценку равномерности распределения задержек по стадиям вычислений на основе моментов генеральной совокупности для поиска потенциальной возможности улучшения характеристик конечного решения. В качестве основного показателя, отражающего приближенность средней величины задержки распределения к нулю, предлагается использовать начальный момент первого порядка [9, с. 52] (математическое ожидание). При сравнении нескольких вариантов решения более сбалансированным будет считаться решение с минимальным значением по данной характеристике.

Сравнительный анализ различных решений

Распределение временных запасов для всех путей схемы может быть графически представлено в виде Slack-гистограммы (рис. 4) [10, с. 12], где на горизонтальной оси располагаются значения показателя Slack, а на вертикальной оси указывает число путей, попадающих в интервал между соответствующими значениями.

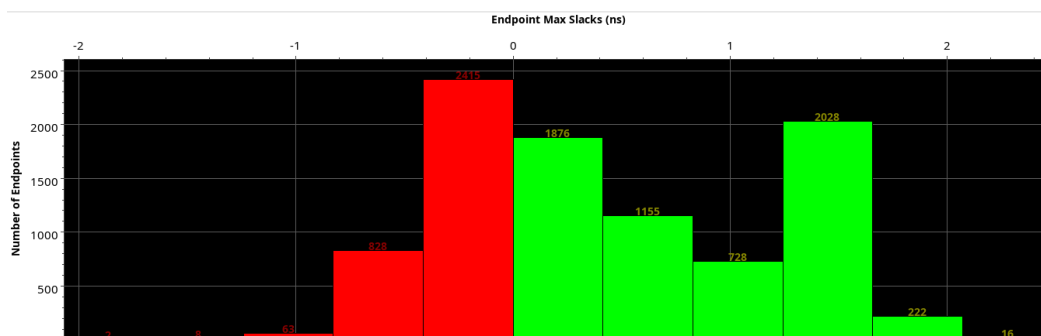


Рис. 4. Пример Slack-гистограммы

Столбцы гистограммы, находящиеся в отрицательной полуоси, имеют красный цвет, в положительной полуоси - зелёный. Полный вариант Slack-гистограммы содержит информацию обо

всех синхронных путях схемы вычислителя. Поскольку с точки зрения конвейерного вычислителя балансировка стадий затрагивает набор путей, определенных в рамках тракта обработки данных, имеет смысл на этапе логического представления выстраивать иерархическую структуру вычислителя с использованием принципа именования стадий вычислений. На основе этих сведений из генеральной совокупности всех путей может быть получена выборка соответствующих путей, относящихся к тракту обработки данных.

На рисунке ниже (рис. 5) приведён пример Slack-гистограммы для варианта размещения конвейерного вычислителя, полученного автоматически при помощи встроенных алгоритмов в САПР Vivado. Как можно заметить по представленной гистограмме, величины показателя временного запаса для синхронных путей распространения сигнала располагаются в диапазоне значений от 0 до 4.2 нс. Подобный разброс временных запасов в свою очередь связан с неравномерностью трассировки компонентов схемы на кристалле. Математическое ожидание для полученного варианта распределения равно 2.44.

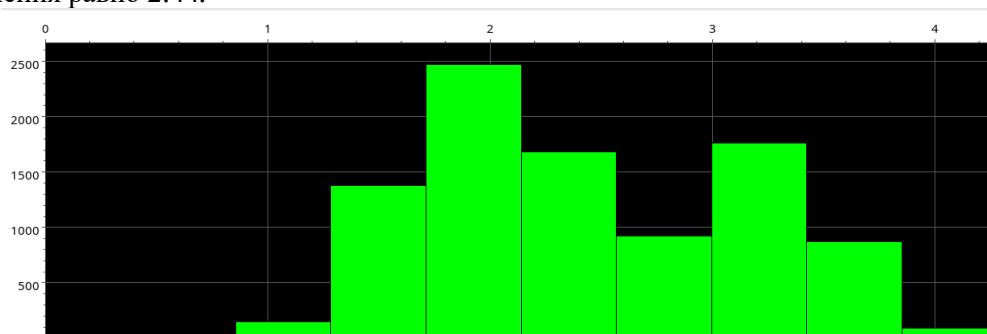


Рис. 5. Slack-гистограмма для рассматриваемого варианта размещения

При построении топологии размещения с учётом близости расположения стадий вычислений может быть получено решение с меньшим разбросом временных запасов (рис. 6). Как можно заметить, для приведённого варианта размещения существует возможность повышения тактовой частоты путём снижения периода тактового сигнала, определяемого в рамках задаваемых ограничений (рис. 7). Для конечного решения с учётом изменённых временных ограничений математическое ожидание равно 1.33.



Рис. 6. Slack-гистограмма для варианта размещения с учётом близости расположения стадий вычислений

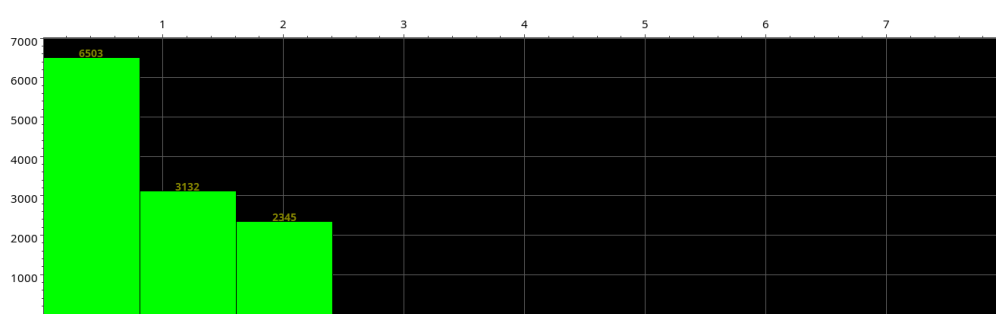


Рис. 7. Slack-гистограмма для варианта размещения с учётом близости расположения стадий вычислений (смещённый вариант)

Далее приведены два примера Slack-гистограмм (рис. 8, 9) для конвейерных вычислителей, реализующих один и тот же алгоритм вычислений с одинаковой тактовой частотой, но при этом основанных на разных вариантах логического представления. Оба приведённых решения удовлетворяют заданным временным ограничениям, для минимизации влияния задержек на линиях трассировки топология размещения вычислителя на кристалле была сформирована с учётом близкого расположения стадий вычисления.

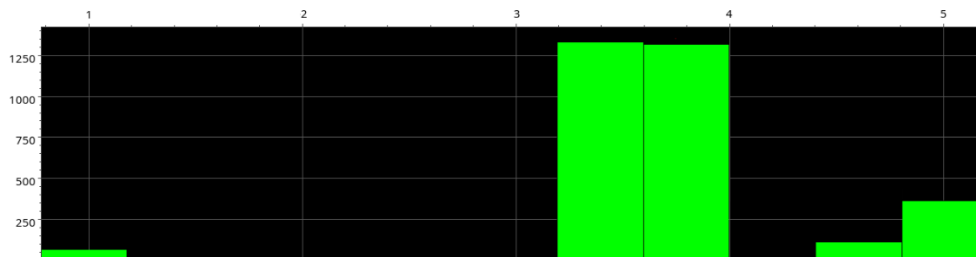


Рис. 8. Slack-гистограмма для первого варианта конечного решения

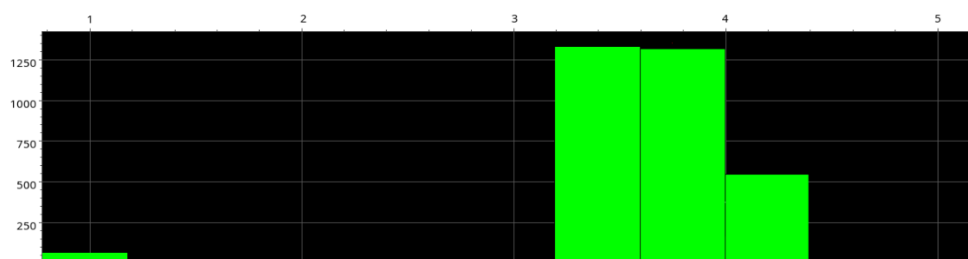


Рис. 9. Slack-гистограмма для второго варианта конечного решения

Представленные варианты решений имеют близкие значения показателя математического ожидания (3.79 для 1-го варианта и 3.73 для 2-го варианта), однако при прямом сравнении двух гистограмм можно заметить, что расстояние между минимальным и максимальным значениями показателя Slack существенно отличается, поскольку во 2-ом варианте решения большее количество путей сосредоточено в рамках одного общего интервала. Это в свою очередь может быть обусловлено более сбалансированным распределением нагрузки между стадиями на этапе формирования логического представления в сравнении с 1-ым вариантом решения, у которого имеется набор путей с высоким временным запасом. Приведённый пример наглядно ограничения использования начальных моментов генеральной совокупности, которые необходимо учитывать при оценке вариантов решений и их последующего сравнения.

Также можно отметить, что в обоих случаях существует потенциальная возможность улучшения характеристик решения путём изменения вычислительной нагрузки и увеличение запаса для критических путей, показанных слева на обеих гистограммах. На стороне синтезатора может быть произведено дополнительное разбиение выявленных критических путей на отдельные стадии с последующим увеличением латентности; для первого варианта решения также существует возможность перераспределения нагрузки между более и менее загруженными стадиями вычислений.

Заключение

В рамках настоящей статьи был рассмотрен вопрос расхождения оценок, производимых для логического и физического представлений конвейерного вычислителя, предложен подход к оценке равномерности распределения вычислительной логики по стадиям конвейерного вычислителя с учётом характеристик аппаратной платформы, рассмотрены примеры применения предлагаемого подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов И.Е., Советов П.Н., Люлява Д.В., Мирзоян Д.И. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12, № 3. С. 37-45.
2. Советов П.Н. Математическое и алгоритмическое обеспечение создания компиляторов предметно-ориентированных языков для специализированных вычислительных машин: специальность 05.13.11 "Математиче-

- ское и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2020. 126 с.
3. Тарасов И.Е. Проектирование для ПЛИС Xilinx на языке System Verilog в САПР Vivado // Компоненты и технологии. 2014. № 12(161). С. 14-22.
 4. Тарасов И.Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. 2019. 538 с.
 5. Тарасов И.Е., Люлява Д.В., Дуксин Н.А. Проектирование конвейерных вычислительных устройств с учетом топологического представления // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 86. С. 86-95.
 6. Churiwala Sanjay. Designing with Xilinx FPGAs: Using Vivado (1st. ed.). Springer Publishing Company, Incorporated. 2016.
 7. Черников Б.В., Можжухина А.В., Черникова Е.А. Анализ методов размещения элементов при проектировании специализированных БИС // Управление развитием крупномасштабных систем ml'sd'2020: Труды 13-й международной конференции, Москва, 28–30 сентября 2020 г. Под общей ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2020. С. 792-798.
 8. Дуксин Н.А., Люлява Д.В. Исследование характеристик конвейеризированных структур // ИТ-Стандарт. 2024. № 4(41). С. 68-82.
 9. Тарасов И.Е., Потехин Д.С. Статистическая обработка данных в информационных системах [Электронный ресурс]: Монография. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2023. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
 10. Tarasov I., Lyulyava D., Duksin N., Duksina I. Design of a Pipeline Computing Module as Part of a Specialized VLSI. In: Jordan, V., Tarasov, I., Shurina, E., Filimonov, N., Faerman, V.A. (eds) High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production. HPCST 2023. Communications in Computer and Information Science. 2024. Vol 1986. Springer, Cham.

Люлява Даниил Вячеславович

Аспирант, старший преподаватель кафедры ВТ,
МИРЭА - Российский Технологический Университет,
119454, Россия, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (499) 600-80-80,
Эл. почта: lyulyava@mirea.ru

D.V. LYULYAVA

AN APPROACH TO EVALUATING THE REGULARITY OF COMPUTATIONAL LOGIC DISTRIBUTION ACROSS THE STAGES OF A PIPELINED COMPUTING DEVICE CONSIDERING THE SPECIFICATION OF THE HARDWARE PLATFORM

The article addresses a number of issues related to evaluating the output characteristics of a pipelined computing device, in particular, the evaluation of the regularity of computational logic distribution across the computation stages. It describes the main representations of a pipelined computing device and examines the use of co-design methodology for developing the final circuit-level solution, specifically the use of a high-level synthesizer in splitting the data processing path while taking into account the technical specifications of the target hardware platform. The principle of stage balancing by the synthesizer is discussed separately, highlighting its role in meeting specified timing constraints. The article also explores the differences between evaluations based on logical and physical representations, discusses potential causes of these differences, and substantiates the need for approaches to evaluate the regularity of the designed solution. The proposed method evaluates the regularity of signal propagation delay distribution based on the moment about zero. In the practical part of the article, the proposed approach is applied to several design variants, demonstrating the influence of the topology of computation stage placement on design regularity, and emphasizing the limitations of using statistical indicators for evaluation of delay distribution.

Keywords: FPGA, HDL, RTL, specialized computing device, pipeline architecture, design flow, positive slack, slack histogram.

REFERENCES

1. Tarasov I.E., Sovetov P.N., Lyulyava D.V., Mirzoyan D.I. Metodika proektirovaniya specializirovannyh vychislitel'nyh sistem na osnove sovmestnoy optimizatsii apparatnogo i programmogo obespecheniya. *Russian Technological Journal*. 2024. Vol. 12. No. 3. P. 37-45 (in Russian).
2. Sovetov P.N. Matematicheskoe i algoritmicheskoe obespechenie sozdaniya kompilyatorov predmetno-orientirovannyh yazykov dlya specializirovannyh vychislitel'nyh mashin: special'nost' 05.13.11 "Matematicheskoe i programnoe obespechenie vychislitel'nyh mashin, kompleksov i komp'yuternykh setej": *dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk*. 2020. 126 p. (in Russian).
3. Tarasov I. Proektirovanie dlya PLIS Xilinx na yazyke System Verilog v SAPR Vivado. *Komponenty i tekhnologii*. 2014. No. 12(161). P. 14-22 (in Russian).
4. Tarasov I. E. PLIS Xilinx. Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya. 2019. 538 p. (in Russian).

5. Tarasov I.E., Lyulyava D.V., Duksin N.A. Projektirovanie konvejnyh vychislitel'nyh ustroystv s uchedom topologicheskogo predstavleniya. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023. No. 86. P. 86-95 (in Russian).
6. Churiwala Sanjay. Designing with Xilinx FPGAs: Using Vivado (1st. ed.). *Springer Publishing Company, Incorporated*. 2016.
7. Chernikov B.V., Mozhzhuhina A.V., Chernikova E.A. Analiz metodov razmeshcheniya elementov pri projektirovanii specializirovannyh BIS. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem mlsd'2020: TRUDY TRINADCATOJ MEZHDUNARODNOJ KONFERENCII*, Moskva, 28.09.2020-30.09.2020. Pod obshchej redakciej S.N. Vasil'eva, A.D. Cvirikuna. *Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN*, 2020. P. 792-798 (in Russian).
8. Duksin N.A., Lyulyava D.V. Issledovanie harakteristik konvejerizirovannyh struktur. *IT-Standart*. 2024. No. 4(41). P. 68-82 (in Russian).
9. Tarasov I.E., Potekhin D.S. Statisticheskaya obrabotka dannyh v informacionnyh sistemah [Elektronnyj resurs]: Monografiya. *Moscow. MIREA – Russian technological university*. 2023. elektron. opt. disk (CD-ROM) (in Russian).
10. Tarasov I., Lyulyava D., Duksin N., Duksina I. Design of a Pipeline Computing Module as Part of a Specialized VLSI. In: Jordan, V., Tarasov, I., Shurina, E., Filimonov, N., Faerman, V.A. (eds) *High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production. HPCST 2023. Communications in Computer and Information Science*. 2024. Vol. 1986. Springer, Cham.

Daniil V. Lyulyava

Post-graduate student, Computer Engineering Department,
MIREA – Russian Technological University,
78, Vernadsky ave., Moscow, Russia, 119454
Phone: +7 (499) 600-80-80,
E-mail: lyulyava@mirea.ru

ВОПРОСЫ КОНФИГУРИРОВАНИЯ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В данной статье рассматриваются вопросы конфигурации массово-параллельной гетерогенной вычислительной системы применительно к задачам анализа регулярных выражений во входящем потоке данных. Для этого рассматриваются аппаратные платформы, на которых можно эффективно производить анализ регулярных выражений, их преимущества и недостатки. Выбор останавливается на связке GPU и ПЛИС, как платформы для реализации специализированных ускорителей. Далее ставится ряд вопросов, которые надо решить в ходе проектирования такого рода системы. Выдвигается предположение о необходимости специализированного синтезатора для связи уровней проектирования, а также для распределения выражений по компонентам системы. Ставится задача об оптимальном распределении вычислительных ядер по кластерам ПЛИС. Впоследствии рассматриваются непосредственно вопросы конфигурирования отдельных компонентов гетерогенной системы: конфигурирование кластеров с использованием собственного ассемблера и конфигурирование GPU с помощью фреймворков для параллельного программирования. Ставится вопрос о необходимости автоматизированного рабочего места для управления системой. Рассматривается ее модульный и функциональный состав, а также особенности взаимодействия с компонентами гетерогенной системы.

Ключевые слова: массово-параллельные вычислительные системы, кластерные вычислители, ПЛИС, RTL, системы класса MISD, частичная реконфигурация, программируемые вычислители, АРМ.

Введение

В эпоху цифровизации человечество генерирует всё больше и больше информации, что создает потребность в эффективных решениях для её обработки. Эти решения могут лежать как в области уменьшения скорости обработки единицы данных для уже имеющихся вычислительных мощностей, так и в области распараллеливания обработки. При этом, распараллеливание обработки намного предпочтительнее ввиду того, что такой подход позволяет более эффективно обрабатывать данные, идущие непрерывным потоком.

Класс таких задач достаточно обширен и включает в себя: цифровую обработку сигналов в реальном времени, распределенные вычисления, компьютерное зрение, обработку видеопотока, анализ сетевого трафика, маршрутизация запросов к распределенным базам данных и т.д.

Наибольший интерес представляет класс задач обработки регулярных выражений (pattern-matching) [1] во входящем потоке, т.к. подобные задачи широко распространены в современных цифровых системах. В силу необходимости анализа соответствия одной единицы данных одновременно множеству выражений, задача хуже поддается распараллеливанию на процессорах общего назначения, чем на других вычислителях, изначально ориентированных на параллельную обработку данных, т.к. количество одновременно сопоставляемых выражений ограничено, в зависимости от процессора, количеством виртуальных либо физических ядер.

Структура гетерогенной системы

Классическим примером вычислителя, изначально ориентированного на параллельную обработку данных является графические процессоры (GPU). В контексте обработки регулярных выражений важно отметить, что по своей сути, для проверки соответствия строится конечный автомат, и в некоторых случаях, на особо сложных выражениях, например, использующих конструкции lookbehind и lookahead [2], автомат изначально может быть недетерминирован. После детерминирования, количество состояний автомата увеличивается пропорционально количеству ϵ -переходов, что сказывается на конечном размере автоматных таблиц, из-за чего, разбор набора таких выражений очень быстро израсходует доступную память, тем самым, не давая возможности нагрузить все доступное количество ядер.

Другим решением может стать использование некоторого специализированного аппаратного ускорителя с возможностью массовой параллельной обработки. Сразу же встает вопрос о виде исполнения такого ускорителя, т.к. очевидно, что набор регулярных выражений может быть изменен со временем под новые условия, что не представляет проблем в случае GPU ввиду того, что в GPU обновление набора обрабатываемых выражений будет заключаться в перезаписи ее памяти.

Тогда, речь идет об ускорителе на основе программируемых вычислителей, что дает возможность перезаписывать память команд и актуализировать набор обрабатываемых регулярных выражений. При этом, если организовать наборы подобных вычислителей в кластеры на ПЛИС, для одновременной обработки нескольких выражений за раз, то можно говорить об исполнении системы класса MISD по Флинну [3]. Наиболее подходящей платформой для такого ускорителя является ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) из-за своей возможности как полной, так и частичной реконфигурации.

Максимальный выигрыш в производительности можно получить при комбинировании вышеописанных устройств в составе гетерогенной системы, в которой наиболее регулярные выражения с большим количеством возможных переходов обрабатываются на ускорителе, а GPU полностью раскрывает свой потенциал на выражениях с единичными переходами.

Вопросы конфигурирования гетерогенной системы

После определения состава гетерогенной вычислительной системы, возникает ряд вопросов, а именно:

1. По какому принципу распределять обработку выражений между компонентами системы?
2. Как определять наполнение кластеров программируемого вычислителя?
3. Каким образом конфигурировать компоненты?
4. Как управлять полученной системой?

Все эти вопросы отсылают к системному уровню в рамках трехэтапного маршрута проектирования [4], на котором и принимаются решение об алгоритмах, выполняющих необходимые задачи (рис. 1).



Рис. 1. Иерархический подход к проектированию

Набор регулярных выражений, обрабатываемых гетерогенной системой также закладывается на системном уровне. Решение о том, какую часть регулярных выражений необходимо обрабатывать на GPU, а какую на ускорителе принимается на основе анализа состава этих выражений. Произвести его можно как классическими алгоритмами [5], так и эвристическими [6].

Для анализа набора регулярных выражений применяется специализированный синтезатор [7], который формирует информацию о распределении выражений по компонентам гетерогенной системы. Синтезатор также генерирует процессорные ядра для обработки некоторого подмножества регулярных выражений. Таким образом, он становится связующим звеном между системным и register-transfer level (RTL) уровнями проектирования.

Имея информацию о распределении выражений и типах ядер ускорителя, ставится задача о распределении полученных типов ядер по кластерам ускорителя, таким образом, чтобы они по-

крывали весь назначенный им набор выражений, при условии ограниченности со стороны аппаратной платформы (рис. 2), что по своей сути является разновидностью задачи о рюкзаке.

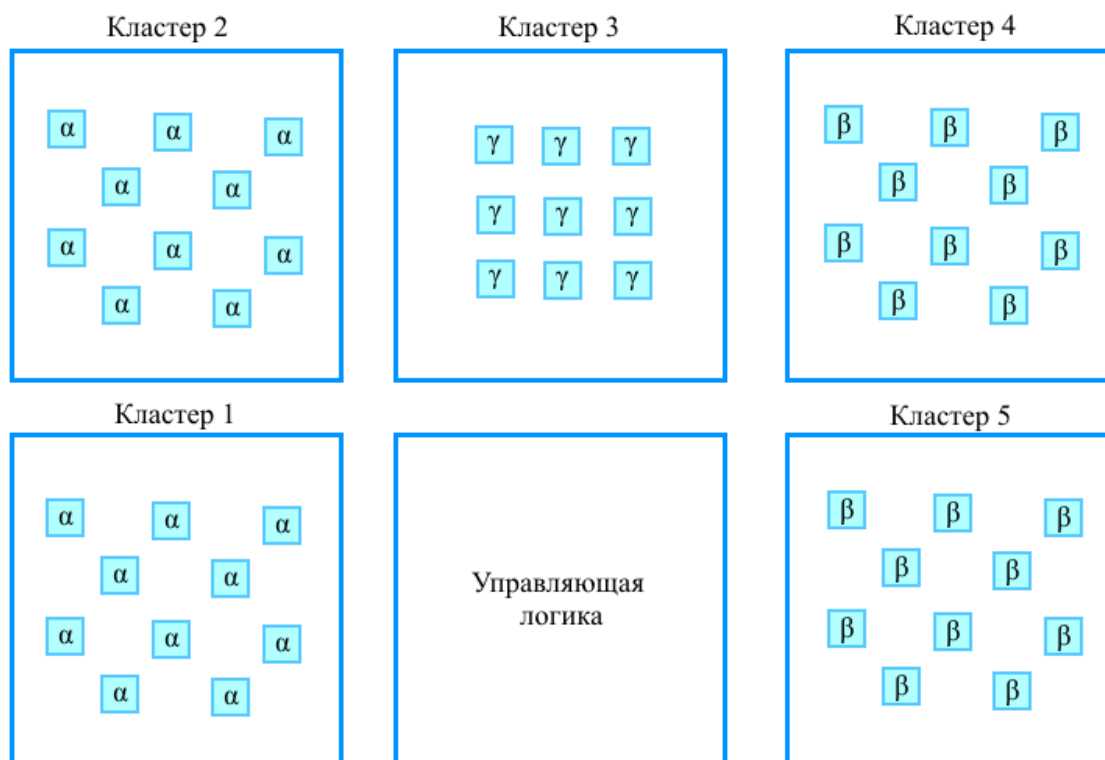


Рис. 2. Пример распределения различных типов ядер по кластерам системы

Далее, компоненты гетерогенной системы необходимо соответствующим образом сконфигурировать. Для специализированного ускорителя нужен некоторый управляющий модуль в составе устройства, который бы мог принимать команды и производить конфигурирование кластеров, а также собирать информацию о них. Исполнять такой модуль целесообразнее в виде soft-процессора, т.к. его возможностей вполне достаточно для решения требуемых задач. Вместе с этим, возникает необходимость в разработке собственного ассемблера для управляющего модуля. Набор команд такого процессора, впрочем, будет зависеть от поставленных требований, и универсального решения здесь нет.

Для конфигурирования GPU потребуются применение фреймворков или SDK (software design kit) для параллельных вычислений, таких как OpenCL [8] или CUDA SDK [9], что говорит о необходимости автогенерации программ для заполнения памяти GPU на этапе системного моделирования. Также необходимо принимать во внимание, что ресурсы GPU должны удерживаться соответствующим процессом системы, в противном случае они будут высвобождены. В случае промышленных вычислений ресурсы обычно удерживаются соответствующим процессом, порожденным фреймворком. В случае, когда гетерогенная система должна работать в составе программно-аппаратного комплекса параллельно с выполнением другой работы, возникает необходимость в создании программы, которая бы порождала процесс в операционной системы и удерживала бы необходимые ресурсы. Дополнительно, этот процесс может являться обработчиком результатов вычислений и поставщиком данных для GPU.

Управление массово-параллельной гетерогенной системой

При использовании рассмотренной выше системы в промышленной эксплуатации рано или поздно может потребоваться изменение набора обрабатываемых регулярных выражений и соответственно реконфигурация компонентов системы. Реконфигурацию компонентов системы выполняет ее оператор. Для этого у него должен быть соответствующий инструментарий, т.е. можно говорить об автоматизированном рабочем месте оператора.

Такой АРМ должен сочетать в себе элементы с первых двух уровней маршрута проектирования:

1. Оператор получает набор регулярных выражений, вносит их в систему.
2. Специализированный синтезатор анализирует набор выражений и выдает распределение по компонентам гетерогенной системы, а также генерирует автоматные таблицы для GPU и ядра для ПЛИС.
3. Для ПЛИС АРМ решает задачу оптимального распределения ядер по кластерам для покрытия максимального количества выражений.
4. Производится загрузка конфигурации в специализированный ускоритель.
5. Для GPU АРМ генерирует программу с применением фреймворков параллельного программирования для загрузки автоматных таблиц в память.

Отдельно стоит остановиться на взаимодействии АРМ и специализированного ускорителя, т.к. по своей сути, именно оператор отправляет команды на реконфигурацию кластеров. Для этого необходимо настроить взаимодействие между АРМ и ускорителем с использованием существующих протоколов, таких как UART и пр. [10], а также организовать поддержку ассемблера управляющего процессора в АРМ.

АРМ также можно использовать для анализа информации с компонентов гетерогенной системы. Помимо сервисной информации, такой как утилизация ресурсов компонентов, скорость потока и т.д., можно организовать в интерактивном режиме индикацию конкретного ядра вычислительного кластера, которое сработало на текущем регулярном выражении.

Заключение

Таким образом, предложена архитектура массово-параллельной гетерогенной системы для анализа регулярных выражений во входящем потоке. Рассмотрены вопросы конфигурирования, сформулированы основные задачи, которые необходимо решить в рамках проектирования такой системы и ее эксплуатации. Предложена концепция автоматизированного рабочего места оператора, ее модульный состав и реализуемый функционал, а также механизм взаимодействия с компонентами гетерогенной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vargas-Bianchi Lizardo. Pattern matching analysis: Overview of its rationale and application in qualitative research // Methodological Innovations. 2025. No. 18. P. 66-75. Doi: 10.1177/20597991251325451.
2. Mamouras K., Chattopadhyay A. Efficient Matching of Regular Expressions with Lookaround Assertions // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2024. Vol. 8, No. POPL. P. 2761-2791. DOI 10.1145/3632934. EDN ENTOSG.
3. Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2024. 688 с.: ил.
4. Дуксин Н.А., Люлява Д.В. Исследование характеристик конвейеризированных структур // ИТ-Стандарт. 2024. № 4(41). С. 68-82.
5. Ульянов В.А., Гурова Е. А. Динамическое программирование - "задача о рюкзаке" // Студенческий. 2019. № 24-1(68). С. 36-38. EDN TVLTFZ.
6. Gorchakov A.V., Demidova L.A. An Approach to Generating Recommendations for Improving the Performance of Software for Heterogeneous Computing Platforms // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 68-76. EDN KMKAIZ.
7. Тарасов И.Е., Советов П.Н., Люлява Д.В., Мирзоян Д.И. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12, № 3. С. 37-45. DOI 10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45. – EDN PXKDKR.
8. Fraire Juan & Ferreyra Pablo & Marques Carlos. OpenCL Overview, Implementation, and Performance Comparison. Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina). 2013. No. 11. P. 274-280. Doi: 10.1109/TLA.2013.6502816.
9. Garland Michael. Parallel computing with CUDA. 2010. No. 1 - 1. Doi: 10.1109/IPDPS.2010.5470378.
10. LaMeres Brock. Serial Communication in C. 2023. Doi: 10.1007/978-3-031-20888-1_14.

Щепухин Денис Олегович

Аспирант кафедры вычислительной техники,
МИРЭА - Российский Технологический Университет,
119454, Россия, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78
Телефон: +7-499-600-80-80,
Эл. почта: shepuhin@yandex.ru

D.O. SHCHEPUKHIN

CONFIGURATION ISSUES OF A MASSIVELY PARALLEL HETEROGENEOUS COMPUTING SYSTEM

This article discusses the configuration of a massively parallel heterogeneous computing system in relation to the tasks of analyzing regular expressions in an incoming data stream. For this purpose, hardware platforms are considered on which it is possible to effectively analyze regular expressions, their advantages and disadvantages. The choice is made on a combination of GPU and FPGA, as a platform for implementing specialized accelerators. Next, a number of issues are raised that need to be addressed during the design of this kind of system. It is suggested that a specialized synthesizer is needed to link design levels, as well as to distribute expressions across system components. The task is to optimally distribute computing cores across FPGA clusters. Subsequently, the issues of configuring individual components of a heterogeneous system are considered directly: configuring clusters using its own assembler and configuring the GPU using

Keywords: *massively parallel computing systems, cluster computers, FPGAs, RTL, MISD class systems, partial re-configuration, programmable computers, ARM.*

REFERENCES

1. Vargas-Bianchi Lizardo. Pattern matching analysis: Overview of its rationale and application in qualitative research. *Methodological Innovations*. 2025. No. 18. P. 66-75. Doi: 10.1177/20597991251325451.
2. Mamouras K., Chattopadhyay A. Efficient Matching of Regular Expressions with Lookaround Assertions. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2024. Vol. 8, No. POPL. P. 2761-2791. DOI 10.1145/3632934. EDN ENTOSG.
3. Orlov S.A. Organizatsiya EVM i sistem: Uchebnik dlya vuzov. 4-e izd. SPb.: Piter, 2024. 688 p. (in Russian).
4. Duksin N.A., Lyulyava D.V. Investigation of the characteristics of pipelined structures. *IT-Standard*. 2024. No. 4(41). P. 68-82 (in Russian).
5. Ulyanov V.A., Gurova E.A. Dinamicheskoe programmirovaniye - "zadacha o ryukzake". *Studencheskij*. 2019. No. 24-1(68). P. 36-38. EDN TVLTFZ.
6. Gorchakov A.V., Demidova L.A. An Approach to Generating Recommendations for Improving the Performance of Software for Heterogeneous Computing Platforms. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 68-76. EDN KMKAIZ.
7. Tarasov I.E., Sovetov P.N., Lyulyava D.V., Mirzoyan D.I. Methodology of designing specialized computing systems based on joint optimization of hardware and software. *Russian Technological journal*. 2024. Vol. 12, No. 3. P. 37-45. DOI 10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45. EDN PXKDKR.
8. Fraire Juan & Ferreyra Pablo & Marques Carlos. OpenCL Overview, Implementation, and Performance Comparison. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*. 2013. No. 11. P. 274-280. Doi: 10.1109/TLA.2013.6502816.
9. Garland Michael. Parallel computing with CUDA. 2010. No. 1 - 1. Doi: 10.1109/IPDPS.2010.5470378.
10. LaMeres Brock. Serial Communication in C. 2023. Doi: 10.1007/978-3-031-20888-1_14.

Denis O. Shchepukhin

Post-graduate student, Computer Engineering Department,
MIREA – Russian Technological University,
78, Vernadsky ave., Moscow, Russia, 119454
Phone: +7-499-600-80-80,
E-mail: shepuhin@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТЫ С ПОДСТРОЙКОЙ ПО СИГНАЛАМ ПЕРЕДАТЧИКОВ СДВ ДИАПАЗОНА И СИГНАЛОВ GLONASS/GPS

В настоящее время плотность передающих радиостанций в эфире очень высока, в связи с чем к передающим устройствам предъявляются высокие требования по точности и стабильности генераторов опорных частот. Данная статья посвящена методам синхронизации частоты прецизионных генераторов по вещаемым эталонам частоты.

Ключевые слова: подстройка частоты, передатчик сверхдлинноволнового диапазон, цифровая обработка, вейвлет-преобразование, вейвлет-функция Морле.

Введение

Сейчас широкое распространение получили термостабилизированные кварцевые генераторы и рубидиевые генераторы [3, 4]. Основные применения подобных генераторов:

- спутниковые навигационные системы, в том числе интегрированные с инерциальными навигационными системами;
- синхронизация оборудования и передачи данных в высокоскоростных вычислительных сетях;
- системы связи, включая широкополосную связь с быстрым переключением несущей частоты и спектральным уплотнением каналов;
- прецизионная измерительная аппаратура с повышенными требованиями к опорному генератору частоты (частотомеры, анализаторы спектра, векторные генераторы, осциллографы и т.д.).

Эти генераторы могут очень точно генерировать частоту, могут обеспечить стабильность от 10^{-9} до единиц 10^{-12} . Таким генераторам нужно время после включения для нагрева термостата и выхода на рабочий режим. Кроме того, есть и другие факторы, влияющие на стабильность частоты генераторов. Существуют решения для компенсации этих уходов, но, тем не менее, частоты всегда будут уходить, поэтому требуется их подстройка по эталонным генераторам. Для точной подстройки генераторов можно использовать эталонные сигналы, которые во всем мире передаются специальными радиостанциями.

Передачу размеров единиц времени, частоты и шкалы времени от государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ) потребителям в России обеспечивают, в основном, при помощи эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ), передаваемых через различные средства передачи, включающие в себя глобальную спутниковую навигационную систему (ГЛОНАСС), радиостанции сверхдлинноволнового (СДВ), длинноволнового (ДВ)- и коротковолнового (КВ) диапазонов как специализированные, служащие только для передачи эталонных сигналов, так и другого назначения (радионавигационные, звукового вещания, телевидения), передающие ЭСЧВ на вторичной основе [1, 5].

Основные эталоны, передаваемые в СДВ диапазоне и их технические характеристики:

- СДВ радиостанции RBU частота $f_{\text{RBU}} = 66.6 \text{ кГц}$;
- СДВ радиостанции RTZ частота $f_{\text{RTZ}} = 50 \text{ кГц}$.

Относительная суточная погрешность по частоте ЭСЧВ, излучаемых радиостанцией:

- RBU.....не более $2 \cdot 10^{-12} \text{ Гц}$;
- RTZ.....не более $5 \cdot 10^{-12} \text{ Гц}$.

Среднесуточное отклонение временного положения характерной точки огибающей ЭСЧВ на выходе антенн передатчиков радиостанций RBU и RTZ относительно шкалы:

- UTC (SU).....не более $\pm 10 \text{ мкс}$.

Наряду с частотой эти радиостанции передают и точное время. Структура сигнала:

Каждые 100 мс передаётся один бит.

Таблица 1

Формат десятой доли секунды

Начало	Длительность	Вид сигнала
+0 мс	10 мс	Немодулированная несущая
+10 мс	80 мс	Несущая, подвергнутая фазовой модуляции синусоидальными сигналами с поднесущими частотами 100 Гц или 312.5 Гц и индексом модуляции 0.698
+90 мс	5 мс	Немодулированная несущая
+95 мс	5 мс	Несущая отключена

Сигналы с поднесущей частотой 312.5 Гц используются для маркирования единиц («1») в двоичном коде. Сигналы с поднесущей частотой 100 Гц используются для маркирования нулей («0») в двоичном коде.

Самый простой и распространенный способ подстройки генераторов связан с использованием системы GPS. GPS дает возможность получать сигналы 1 PPS, который вырабатывается приёмником один раз в секунду - в момент перехода с одной секунды на другую с высочайшей точности одновременно в любой части света с пиковыми ошибками всего в десятые доли наносекунды и средними ошибками за длительный период, практически равными нулю.

Сигналы GPS обеспечивают 24 основных спутника и несколько резервных. Предусматривается поддержание и развитие этого сервиса по крайней мере до 2030 года.

Импульсы 1 PPS, полученные, вернее, рассчитанные приемниками GPS на основе принятых от спутников сигналов, используются для так называемого дисциплинирования генераторов опорной частоты. Основные частоты генераторов опорной частоты составляют 5, 10 и 100 МГц.

Отличие опорной частоты от точного значения, например, 10 МГц, приводит к потере синхронизации генератора со шкалой времени. При этом не так важна мгновенная ошибка частоты, как средняя ошибка за длительный период времени. Даже небольшая ошибка, постепенно накапливаясь, приводит в конце концов к потере синхронизации [8,10].

При пропадании сигналов GPS от спутников устройство в течение нескольких часов удерживает синхронизацию, благодаря внутреннему термостабилизированному опорному генератору 10 МГц. Тем не менее, потеря синхронизации в таких условиях – вопрос времени.

Поэтому важно иметь возможность принимать сигналы точного времени по разным каналам. В данной работе сигналы, принимаемые со спутников, предлагается дублировать, используя информацию о частоте и времени передаваемую СДВ радиостанциями РБУ и РТЗ.

Разрабатываемая принимающая антенна.

Для приема СДВ сигналов была разработана активная магнитная антенна. Сама антенна представляет собой ферритовый стержень 600мм 200х10. Намотка виток к витку проводом ПЭЛШО-0,2 (рис. 1).



Рис. 1. Намотанная антенна

Магнитная антенна, показанная на рисунке 1, имеет характеристики:

– индуктивность – $L = 12.36$ мГн; – добротность $Q = 45$.

Антенный усилитель выполнен на микросхеме AD8129 для того, чтобы обеспечить высокое входное сопротивление усилителя и обеспечить усиление сигнала. На выходе установлен развязывающий трансформатор для согласования импеданса в кабеле. Схема питания построена на двух малошумящих линейных стабилизаторах для введения искусственной средней точки и уменьшения количества шумов, наводимых на кабель.

На рисунке 2 приведен спектр принимаемых антенной частот полосой 700 Гц, с частотой, вещаемой РБУ.



Рис. 2. Спектр частот принимаемых принимаемый активной антенной, настроенной на резонанс 66.(6) кГц, полоса сигнала 700 Гц

В центре спектра, представленного на рисунке 2, находится частота, вещаемая RBU, рядом пары спектров соответствуют поднесущим частотам 100 и 312.5 Гц.

Алгоритмы работы устройства.

На рисунке 3 приведена структурная схема аппаратных алгоритмов работы устройства синхронизации от радиосигналов передатчиков сверх длинноволнового диапазона и сигналов GLONASS/GPS.

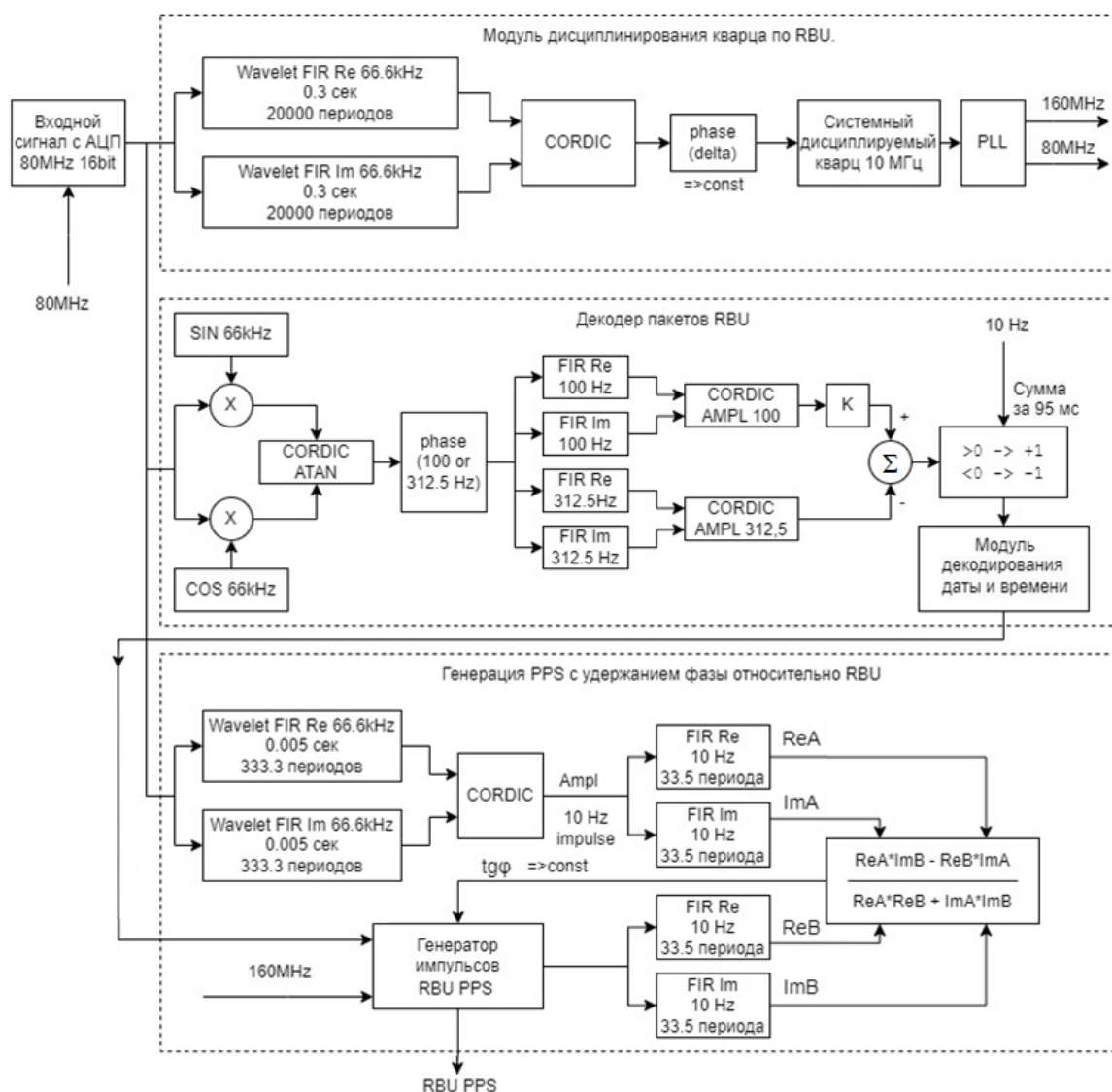


Рис. 3. Структурная схема аппаратных алгоритмов работы приемника

Аппаратные алгоритмы работы устройства можно разделить на 4 части:

- программно-аппаратные алгоритмы подстройки частоты опорного генератора (термостабилизированного кварцевого резонатора или рубидиевого стандарта частоты) по измерению величины фазовых набегов сигналов точного времени СДВ и опорного генератора (на рисунке 3 обозначен как модуль дисциплинирования кварца);

- аппаратные алгоритмы автономной генерации PPS, вырабатываемых на основе принимаемых сигналов точного времени СДВ (состоит из декодера пакетов и генерации PPS с удержанием фазы относительно RBU или RTZ);

- аппаратные алгоритмы выработки сигналов синхронизации на основе принимаемых данных от СДВ и GLONASS/GPS;

- программно-аппаратные алгоритмы формирования сигнала PPS, вырабатываемых на основе принимаемых сигналов СДВ, и его «привязки» к PPS вырабатываемых спутниковым приемником GLONASS/GPS и принимаемых сигналов точного времени СДВ.

Основой алгоритма подстройки частоты опорного генератора (термостабилизированного кварцевого резонатора или рубидиевого стандарта частоты) по сигналам СДВ радиостанций является измерение величины фазовых набегов сигналов точного времени СДВ и опорного генератора.

Обработка сигналов велась по оригинальной методике, с использованием модифицированной вейвлет-функции Морле, изложенной в [6, 7, 9], согласно которой размер модифицированной вейвлет-функции Морле для определения фазы можно рассчитать:

$$N = \frac{12 Q \ln 2 \sqrt{2n}}{\pi} \cdot \frac{f_d}{f_0} \quad (1)$$

где f_0 – частота сигнала, f_d – частота дискретизации, Q – добротность.

Для описанных частот, добротности и разрядности вейвлет-функции расчет показывает, что $N > 43\,000\,000$ точек или пар 18-ти битных чисел за 0.2 секунды. Другими словами, требуется поток данных более 7.5 Гбит/с. Это довольно большой поток данных, причем данные должны следовать непрерывно и монотонно, а не пакетами. Поэтому и требуется непрерывный поиск коэффициентов модифицированной вейвлет-функции Морле [2, 6].

Наименьший общий коэффициент деления равен 600, т.е. через 600 импульсов опорной частоты f_{on} фазы всех трех сигналов совпадут с точностью, определяемой фазовыми набегам всех трех источников частоты, относительно друг друга.

Для одинаковых частот величину фазового набега лучше считать из отношения мнимой и реальной части вейвлет-преобразования:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\operatorname{Im} W}{\operatorname{Re} W} \quad (2)$$

Далее сдвиг фаз лучше преобразовать во временную задержку, по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi}{2\pi f} \quad (3)$$

Временная задержка будет привязана к опорной частоте f_{on} . Таким образом, восстанавливая векторную диаграмму [6], можно определить сдвиг фаз, выраженный в единицах времени, указанных генераторов относительно друг друга. После чего достаточно поставить ПИД регулятор и подавать сигнал подстройки на генератор опорной частоты.

Далее, для автономной генерации PPS достаточно поделить опорную частоту на 10 000 000 и получим секундные импульсы. Останется только произвести синхронизацию фронтов сгенерированных импульсов с импульсами PPS, полученными либо со спутниковых систем связи, либо на основе принимаемых сигналов точного времени СДВ, либо используя оба канала.

На рисунке 4 представлена фотография экрана с демонстрацией работы алгоритма подстройки частоты, где голубым цветом представлена фаза сигнала RBU относительно опорного генератора, красным – амплитуда, желтым – усредненная разность фаз.

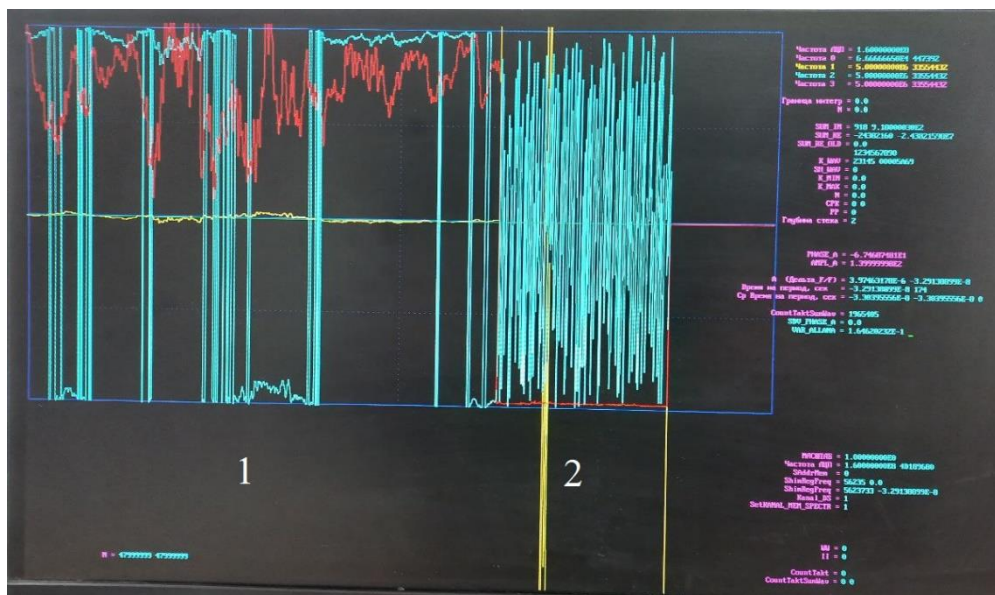


Рис. 4. Фотография экрана с демонстрацией работы алгоритма подстройки частоты

На фотографии можно выделить две зоны:

- зона, обозначенная цифрой 1, в которой идет процедура подстройки частоты;
- зона, обозначенная цифрой 2, в которой сигнал RBU не транслируется.

Дело в том, что каждый третий вторник четного месяца радиостанция отключается, для проведения профилактических работ. Фотография сделана 17.10.2023, это как раз третий вторник четного (десятого) месяца. Об отсутствии сигнала говорит резкое падение амплитуды сигнала и случайное поведение фазы.

Метод восстановления векторной диаграммы с использованием ортогональных вейвлет-функций обладает высокой помехозащищенностью и способен работать при малых амплитудах сигнала. Поэтому критерием потери сигнала может являться как раз случайное поведение фазы. Это событие хорошо регистрируется усредненной разностью фаз.

Алгоритмы «привязки» PPS, вырабатываемых на основе принимаемых сигналов СДВ, к PPS, вырабатываемых спутниковым приемником GLONASS/GPS

Как уже говорилось выше устройство синхронизации объектов цифрового телевизионного вещания РТПС от радиосигналов передатчиков сверх длинноволнового диапазона и сигналов GLONASS/GPS представляет собой программно-аппаратный комплекс.

На рисунке 5 приведена структурная схема аппаратных алгоритмов работы устройства синхронизации объектов цифрового телевизионного вещания РТПС от радиосигналов передатчиков сверх длинноволнового диапазона и сигналов GLONASS/GPS.

Как видно из представленного алгоритма первым шагом требуется подтвердить валидность сигнала PPS (отсутствия GPS-спуфинга), полученного приемником GLONASS/GPS. Для этого достаточно сравнить координаты антенны, принимаемые с GLONASS/GPS с его реальными координатами, хранящимися в памяти управляющей программы.

Для реализации дальнейшей части алгоритма, блок-схема которого представлена на рисунке 5, используются методы и алгоритмы обработки сигналов:

- алгоритм непрерывного нахождения коэффициентов модифицированной вейвлет-функции Морле [2, 7];
- алгоритм подстройки частоты опорного генератора (термостабилизированного кварцевого резонатора или рубидиевого стандарта частоты) по измерению величины фазовых набегов сигналов точного времени СДВ и опорного генератора;
- алгоритм формирования сигналов PPS по результатам декодирования информации, передаваемой совместно с сигналами точного времени по СДВ каналу;
- алгоритмы выработки сигналов синхронизации на основе принимаемых данных от СДВ и GLONASS/GPS.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма формирования PPS, вырабатываемого на основе принимаемых сигналов СДВ и PPS, вырабатываемых спутниковым приемником GLONASS/GPS

Собственно, сигнал PPS формируется по двум внутренним сигналам PPS, сформированным по GLONASS/GPS и RBU/RTZ, если они оба качественные, либо по одному из сигналов, если качественный один из них. Если оба не качественные, то хранится значение PPS, соответствующее последней коррекцией. При этом время хранения сформированного сигнала PPS зависит от качества опорного генератора, термостабилизированного кварца или рубидиевого эталона частоты, от которого тактируются все аппаратные модули устройства синхронизации и который дисциплинируется по приему сигналов GLONASS/GPS и RBU/RTZ.

На рисунке 6 приведена фотография изготовленного макета генератора частоты с подстройкой по сигналам передатчиков СДВ диапазона и сигналов GLONASS/GPS.

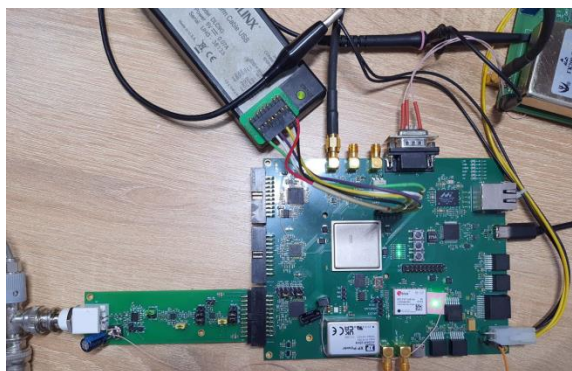


Рис. 6. Фотография изготовленного макета генератора частоты с подстройкой по сигналам передатчиков СДВ диапазона и сигналов GLONASS/GPS

Заключение

Использование описанных алгоритмов позволило обеспечить синхронизацию сигналов PPS не хуже 0.5 мкс. Исследования, проведенные на макете устройства показали, что достижима точность синхронизации по сигналу PPS, принятому спутниковым приемником GLONASS/GPS, составляет 0.1 мкс, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к устройствам подобного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинов И. Ю и др. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли, и ее деятельность по обеспечению потребителей эталонными сигналами частоты и времени и информацией о точ-

- ном времени // Вестник метролога. 2016. № 4. С. 7-11.
2. Карпенков А.С., Гришанович Ю.В., Потехин Д.С., Тетерин Е.П. Методика расчета целочисленного цифрового селекторного нерекурсивного фильтра с заданными добротностью и уровнем подавления // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. №6(1). С.79-85.
 3. Иванов Ю. Современные кварцевые и рубидиевые генераторы. М.: Современная электроника, 2024. №1 С. 32-38.
 4. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения; пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 512 с.
 5. Рощин Д.А. Модернизация программно-математического комплекса для сравнения шкал времени эталонов времени и частоты по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 1. С. 93-105.
 6. Потехин Д.С. Интегральный метод восстановления векторной диаграммы в системах цифровой обработки данных // Системы управления и информационные технологии. 2011. №2.1(44). С. 161-164.
 7. Потехин Д.С., Тарасов И.Е., Тетерин Е.П. Влияние коэффициентов и пределов интегрирования вейвлет-функции Морле на точность результатов анализа гармонических сигналов с нестационарными параметрами // Научное приборостроение. 2002. Т. 12. № 1. С. 90-95; ISSN 0868-5886.
 8. Потехин Д.С. Влияние белого шума на точность определения амплитуды и фазы гармонических сигналов с использованием вейвлет-преобразования функцией Морле // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 4.1(38). С. 180-183.
 9. Потехин Д.С., Гришанович Ю.В. Построение цифрового приемника эталонных частот // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №1. С. 67-71.
 10. Потехин, Д.С., Потехин С.Д., Бадалян Н.П. Влияние эффекта Саньяка на погрешность сличения частот радиовещаемых стандартов частоты-времени // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2015. № 1. С. 97-110. EDN RSIXWL.

Потехин Дмитрий Станиславович

Доктор технических наук, профессор кафедры
вычислительной техники
МИРЭА - Российский технологический университет,
119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78
Тел.: +7(900)474-49-97
Эл.почта: msyst@msyst.ru

Гришанович Юлия Васильевна

Кандидат технических наук,
доцент кафедры ЛТиОБС,
Ковровская государственная технологическая
академия им.В.А.Дегтярева
601910 г. Ковров, Маяковского, 19
Тел.: +7(920)9425492
Эл.почта: ulagri.kovrov@mail.ru

Потехин Сергей Дмитриевич

Ведущий инженер ФГУП «ВНИИФТРИ»
141570, Московская обл., г. Солнечногорск, п. Менделеево
Тел.: +7(900)474-49-97
Эл.почта: vexilurz@gmail.com

D.S. POTEKHIN, U.V. GRISHANOVICH, S.D. POTEKHIN

CONSTRUCTION OF A FREQUENCY GENERATOR WITH TUNING BASED ON SIGNALS FROM ULTRA-LONG WAVE RANGE AND GLONASS/GPS SIGNALS

Currently, the density of transmitting radio stations on the air is very high, and therefore high demands are placed on transmitting devices for the accuracy and stability of reference frequency generators. This article is devoted to methods of frequency synchronization of precision oscillators according to broadcast frequency standards.

Keywords: frequency tuning, ultra-long wavelength transmitter, digital processing, wavelet transform, morlet wavelet function.

REFERENCESE

1. Blinov I.Yu. and others. The State Service of Time, Frequency and Determination of the Parameters of the Earth's Rotation, and its activities to provide consumers with reference frequency and time signals and information about the exact time. *Bulletin of the metrologist*. 2016. No. 4. P. 7-11.
2. Karpenkov A.S., Grishanovich Yu.V., Potekhin D.S., Teterin E.P. Method of calculating an integer digital selector non-recursive filter with a given quality factor and suppression level. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*. 2009. №6(1). P.79-85.
3. Ivanov Yu. Modern quartz and rubidium generators. *Moscow. Modern Electronics*. 2024. No. 1 P. 32-38.
4. Riele F. Frequency standards. Principles and applications; translated from English. *Moscow. FIZMATLIT*. 2009. 512 p.
5. Roshchin D. A. Modernization of a software and mathematical complex for comparing time scales of time standards and frequency based on signals from global navigation satellite systems. *Applied Informatics*. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 93-105.
6. Potekhin D. S. Integral method of vector diagram reconstruction in digital data processing systems. *Control systems and information technologies*. 2011. №2.1(44). P. 161-164.

7. Potekhin D.S., Tarasov I.E., Teterin E.P. The influence of coefficients and limits of integration of the Morlaix wavelet function on the accuracy of the results of the analysis of harmonic signals with non-stationary parameters. *Scientific instrumentation*. 2002. Vol. 12. No. 1. P. 90-95; ISSN 0868-5886.
8. Potekhin D.S. The influence of white noise on the accuracy of determining the amplitude and phase of harmonic signals using the Morlaix wavelet transform. *Management systems and information technologies*. 2009. No. 4.1(38). P. 180-183.
9. Potekhin D.S., Grishanovich Yu.V. Construction of a digital receiver of reference frequencies. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*. 2011. No. 1. P. 67-71.
10. Potekhin, D.S., Potekhin S.D., Badalyan N.P. The influence of the Sagnac effect on the error of comparing frequencies of radio-broadcast frequency-time standards. *Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical engineering, power engineering*. 2015. No. 1. P. 97-110. EDN RSIXWL.

Dmitry S. Potekhin

Doctor of Technical Sciences, Professor of
Corporate Informational Systems department,
MIREA - Russian Technological University
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454
Phone: +7(900)474-49-97
E-mail: msyst@msyst.ru

Yuliya V. Grishanovich

PhD, Associated Professor, Department of Physics,
Kovrov State Technological Academy
named after V.A. Degtyarev
19, Mayakovskaya, Kovrov, Russia, 601910
Phone: +7(920)942-54-92
E-mail: ulagri.kovrov@mail.ru

Sergey D. Potekhin

Engineer at FSUE VNIIFTRI
Mendeleev settlement, Solnechnogorsk,
Moscow Region, 141570
Phone: +7(900)474-49-97
E-mail : vexilurz@gmail.com

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОФИЗИЧНЫХ ЗАДАЧ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Многие окружающие нас явления характеризуются сложным взаимодействием разных физических процессов. Многофизичная задача – математическая формализация данного взаимодействия, которая состоит из системы дифференциальных уравнений, начальных и краевых условий, а также условий сопряжения физических полей. Проблема заключается в том, что каждая математическая модель в сегрегированном рассмотрении может быть корректно аппроксимирована с помощью определённого подхода. Большинство доступных в настоящее время инструментов численного моделирования заточены под конкретную численную модель, поэтому приходится прибегать к комбинированию различных схем на основе расщепления операторов. Применительно к прикладным задачам геофизики такая стратегия не всегда приводит к физически релевантному результату численного моделирования, поскольку порода обладает многомасштабным строением и контрастными свойствами. Нашим коллективом накоплен опыт решения проблем данного класса. Предлагается применить вычислительные схемы многомасштабных неконформных методов конечных элементов при использовании иерархических сеточных моделей. Первый уровень иерархии – симплициальная микросеточная модель – принимает во внимание все структурные особенности изучаемого объекта. Далее микромасштабная сетка факторизуется, и выстраивается макромасштабное полиэдральное сеточное разбиение, каждый элемент которого является носителем локального решения задачи. Математические модели физических моделей на каждом масштабе могут различаться, а связь между масштабами реализуется в рамках методов теории эффективных сред и путём численного определения функций формы. Таким образом, многомасштабность может быть как геометрической, так и функциональной. Предложенная декомпозиция многофизичной задачи допускает асинхронное параллельное решение подзадач, а метод факторизации микромасштабного симплициального разбиения определяется только условием взвешенного распределения подзадач по узлам вычислительной системы. На примере разных классов прикладных задач геофизики продемонстрированы возможности предлагаемого подхода, анализ затрат вычислительных ресурсов и сравнение результатов с классическими общепринятыми методами решения.

Ключевые слова: *многофизичная задача, многомасштабное математическое моделирование, неконформные методы конечных элементов.*

Введение

Многомасштабное моделирование – это область решения физических проблем, которые имеют важные характеристики в нескольких масштабах, в частности нескольких пространственных и (или) временных. Многомасштабное моделирование в физике направлено на численное определение свойств материала или поведения системы на одном уровне с использованием информации или моделей с разных уровней. На каждом уровне для описания системы используются определенные подходы [1, 2].

Существуют разные методы численного моделирования. Методы конечных элементов первоначально имели приложения в механике твёрдого тела, а в вычислительной гидродинамике популярность завоевали схемы метода конечных объёмов, а также, в некоторой степени, граничные элементы [3, 4]. В последнее время значительное количество исследований направлено на разработку бессеточных методов, а также на развитие новых подходов, базирующихся на изометрическом анализе и виртуальных элементах [5, 6].

Подготовка расчётной сетки – один из ключевых факторов, влияющих на эффективность решения прикладных задач. Для построения дискретных аналогов микромасштабной структуры осадочных пород применяются различные неразрушающие методы визуализации. На основе информации о внутренней структуре возможно создание цифровых двойников. Предваряющим математическое моделирование этапом является переход от стека послойных изображений к некоторой трёхмерной структурной модели. Формат модели напрямую зависит от физического эксперимента, который планируется воспроизводить на ней численно, и реализуемого численного метода. В случае решения прикладных задач методом конечных элементов и его модификациями предлагается построение трёхмерной сеточной модели среды, которая должна максимально точно отображать все внутренние особенности исследуемого образца породы.

Применение многомасштабных, виртуальных и гетерогенных конечноэлементных методов предполагает наличие иерархии сеточных разбиений, либо нестандартной формы конечных элементов и, соответственно, особого подхода к построению дискретной геометрической модели по

стеку послойных изображений. Предлагается рассмотреть специальную сеточную иерархию, которая ориентирована на многомасштабные модификации метода конечных элементов для решения многофизических задач. Предлагаемая иерархическая сеточная структура включает в себя два основных уровня: разбиение на макроэлементы и первичное подразбиение каждого макроэлемента на тетраэдры. Учет микроструктурных особенностей среды, информация о которых извлекается из стека КТ-изображений, выполняется на уровне каждого макроэлемента при перестроении его внутреннего симплициального разбиения таким образом, чтобы оно включало границы раздела подобластей. Это позволяет, во-первых, точнее учитывать мелкомасштабную внутреннюю структуру среды, а во-вторых, избежать катастрофического роста сеточного разбиения за счет независимой работы на уровне каждого макроэлемента.

В расчётных областях со сложной структурой и многофазным составом применяются многомасштабные методы, которые обладают следующими вычислительными преимуществами [7, 8]:

1. используется общая вычислительная платформа для математического моделирования физических процессов в разных частях расчётной области;
2. для дискретизации математических моделей могут быть использованы разные вычислительные схемы;
3. многомасштабное разрешение и адаптивность: крупномасштабные подобласти могут соединяться с мелкомасштабными, а динамическая адаптация сетки может быть выполнена локально в каждой подобласти;
4. подобласти нерегулярной структуры могут быть представлены как объединение более регулярных и локально однородных подобластей с применением технологий неконформных сеточных разбиений;
5. естественный параллелизм: алгоритмы имеют почти оптимальный баланс вычислительной нагрузки и минимальный расход ресурсов при обмене данными между подобластями.

Необходимо отдельно сформулировать специальные граничные операторы для обеспечения непрерывности решения на межфрагментарных границах. Наиболее общий и удобный в использовании математический аппарат для построения таких операторов предлагают многомасштабные конечноэлементные методы. Например, многомасштабный метод конечных элементов [9], в котором пространство решения является иерархическим и содержит два или более уровней, каждое из которых соответствует одному физическому или геометрическому масштабу рассматриваемой задачи. На каждом из уровней иерархии формулируются специальные подзадачи для построения локальных подпространств. Процедуры согласования уровней иерархии выбираются в соответствии со спецификой моделируемых процессов. Это обеспечивает достаточную гибкость и адаптивность метода.

Сформулируем основные этапы решения задач в контексте применения двухуровневого подхода (под верхним уровнем здесь и далее будем понимать макроуровень, отвечающий за эффективные свойства среды, нижний уровень – макроуровень, позволяющий детально учесть все неоднородности среды):

1. Построение сеточной иерархии, а именно разбиение всей области моделирования на подобласти (макроэлементы) без налегания и без строгого учета внутренней геометрической структуры, далее каждый из макроэлементов разбивается независимо на микроэлементы с учетом внутренней структуры.
2. Построение функциональной иерархии, то есть формирования макромасштабных функций формы, обеспечивающих гладкость решения, через серию подзадач на каждом из макроэлементов, используя микроэлементные разбиения.

Алгоритм построения иерархического сеточного разбиения

Для прямого математического моделирования физических процессов в образце с визуализированной внутренней структурой необходимо перейти от последовательности (стека) его послойных цифровых изображений к некоторому дискретному аналогу, учитывающему микроструктурные особенности породы. Основная идея предлагаемых ниже алгоритмов приведена на рисунке 1.

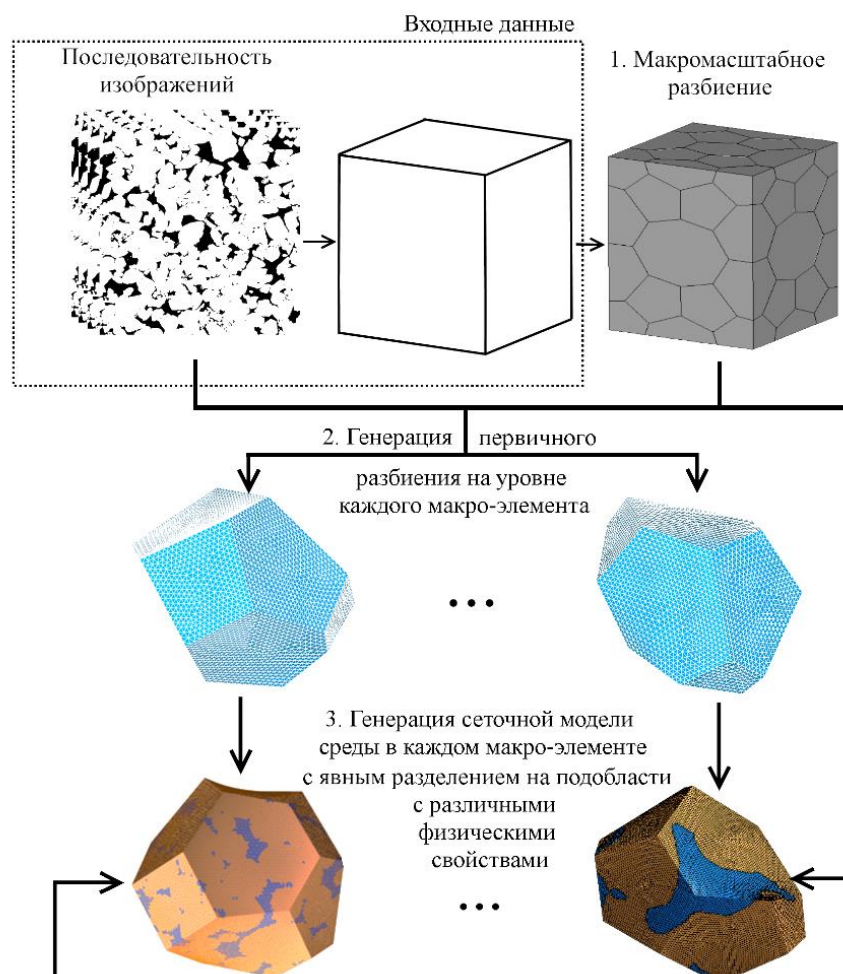


Рис. 1. Алгоритм построения иерархического сеточного аналога внутренней структуры среды

В качестве входных данных используется набор изображений в градациях серого, от которого необходимо перейти к набору сегментированных изображений с конечным числом подобластей – этап построения макроэлементного разбиения расчётной области. Форма макроэлемента выбирается в соответствии с особенностями изучаемого образца – его внутренней структуры и внешней геометрии. В общем случае макроэлемент представляет собой полиэдр. Целесообразно строить регулярное макроэлементное разбиение без учёта внутренних особенностей образца.

Неоднородности среды внутри каждого элемента макроразбиения учитываются на уровне его внутреннего разбиения на тетраэдры – микроразбиения.

На рисунке 2 изображены восстановленная структура образца песчаника Berea и вариант микросеточной аппроксимации структурных особенностей его порового пространства.

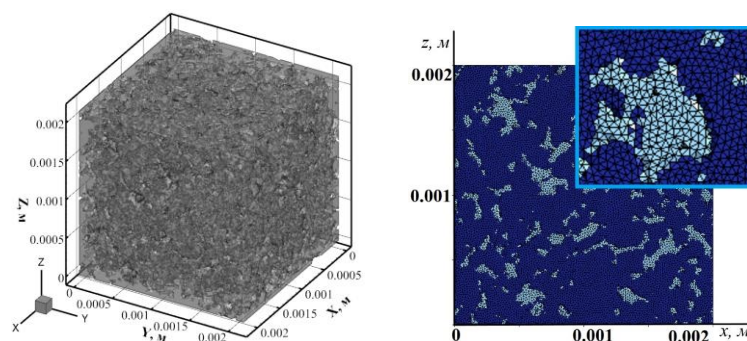


Рис. 1. Восстановленная внутренняя структура образца песчаника Berea

В таблице 1 приведены результаты исследования масштабируемости алгоритма построения иерархического сеточного разбиения в зависимости от числа задействованных ядер процессора.

Вычисления проводились на ПК со следующими характеристиками: AMD Ryzen™ 7 5800HS 4.4 GHz. Распараллеливание выполнялось под общей памятью с использованием библиотеки OpenMP. Поскольку разные макроэлементы содержат различные относительные объёмные доли включений, была использована динамическая балансировка загрузки CPU.

Таблица 1

Сравнительный анализ времени работы алгоритма в зависимости от числа выделенных ядер

Число ядер	Время работы, с	Ускорение
1	7044.72	-
2	3254.01	2.16
4	2014.98	3.49
8	1428.98	4.92

Далее будет продемонстрировано, как предложенная декомпозиция расчётной области может быть использована для численного моделирования течения жидкости в многомасштабной пористой среде.

Многомасштабное численное моделирование течения жидкости в пористой среде

Рассматривается задача о течении однофазной жидкости в цифровой модели образца песчаника Вега, структура которого была восстановлена по результатам томографических исследований (см. рис. 2). Физические характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2

Физические свойства

Среда	Пористость, %	Проницаемость, м ²	Вязкость, Па·с	Плотность, кг/м ³
Песчаник	19	10 ⁻¹⁵	—	2500
Вода	—	—	0.001	1000

Каждый элемент многомасштабной сетки независимо аппроксимируется микромасштабным тетраэдральным разбиением. Согласованность микромасштабной сетки на межфрагментарных границах не требуется при использовании неконформных конечноэлементных методов.

Математическая модель стационарного течения жидкости в системе несвязного порового пространства Ω_l^{matrix} и порах Ω_l^{pores} описывается системой уравнений

$$\nabla p_1 = \nabla \cdot \mu \left(\nabla \mathbf{v}_1 + (\nabla \mathbf{v}_1)^T \right) + \rho \mathbf{g} \text{ в } \Omega_l^{\text{pores}}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_1 = 0 \text{ в } \Omega_l^{\text{pores}},$$

$$\mathbf{v}_2 = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot (\nabla p_2 + \rho \mathbf{g}) \text{ в } \Omega_l^{\text{matrix}}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_2 = 0 \text{ в } \Omega_l^{\text{matrix}},$$

где ρ – плотность флюида [кг/м³], μ – динамическая вязкость флюида [Па·с], $\mathbf{K}$ – тензор абсолютной проницаемости [м²], p_1 – давление жидкости в кавернах и макропорах [Па], p_2 – давление жидкости в пористой среде [Па], $\mathbf{v}_1$ – скорость течения в кавернах и макропорах [м/с], $\mathbf{v}_2$ – скорость течения в пористой среде [м/с], $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения.

На границе пористой среды и каверны Γ_{12} должны выполнять условия идеального контакта как для нормальной компоненты вектора скорости, так и для давления

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_{12}|_{\Gamma_{12}} = \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{n}_{12}|_{\Gamma_{12}}, \quad (3)$$

$$\left[p_1 \mathbf{I} - \mu \left((\nabla \mathbf{v}_1)^T + \nabla \mathbf{v}_1 \right) \right] \cdot \mathbf{n}_{12} \cdot \mathbf{n}_{12} \Big|_{\Gamma_{12}} = p_2|_{\Gamma_{12}}, \quad (4)$$

здесь $\mathbf{n}_{12}$ – единичный вектор внешней нормали относительно стенки каналов и макропор.

Граница просачивания может быть негладкой, тогда учёт трения реализуется при использовании закона Бивера-Джозефа-Саффмана

$$\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_{12}|_{\Gamma_{12}} = -m\mu \left((\nabla \mathbf{v}_1)^T + \nabla \mathbf{v}_1 \right) \cdot \mathbf{n}_{12} \cdot \boldsymbol{\tau}_{12}|_{\Gamma_{12}}, \quad (5)$$

где m – коэффициент трения, зависящий от шероховатости поверхности и числа Рейнольдса.

Если движение жидкости вызвано перепадом давления на границе втекания S_{inlet} и вытекания S_{outlet} , то краевые условия формулируются как

$$\left[-p_1 \mathbf{I} + \mu \left((\nabla \mathbf{v}_1)^T + \nabla \mathbf{v}_1 \right) \right] \cdot \mathbf{n} \Big|_{S_{\text{inlet}}} = \mathbf{t}_{\text{inlet}}, \quad (6)$$

$$\left[-p_1 \mathbf{I} + \mu \left((\nabla \mathbf{v}_1)^T + \nabla \mathbf{v}_1 \right) \right] \cdot \mathbf{n} \Big|_{S_{\text{outlet}}} = \mathbf{t}_{\text{outlet}}, \quad (7)$$

$$p_2 \Big|_{S_{\text{inlet}}} = \mathbf{t}_{\text{inlet}} \cdot \mathbf{n}, \quad (8)$$

$$p_2 \Big|_{S_{\text{outlet}}} = \mathbf{t}_{\text{outlet}} \cdot \mathbf{n}, \quad (9)$$

где $\mathbf{n}$ – единичный вектор внешней нормали относительно внешних границ.

На непроницаемой внешней границе S_{wall} , которая не пересекается с границами втекания S_{inlet} и вытекания S_{outlet} , заданы краевые условия

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n} \Big|_{S_{\text{wall}}} = 0, \quad \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{n} \Big|_{S_{\text{wall}}} = 0. \quad (10)$$

Задачи (1) – (10) могут решаться параллельно на каждой ячейке декомпозиции. В соответствии с методом Шварца реализуется итерационная процедура, в которой на интерфейсных границах формулируются условия (3) – (9) относительно решения, полученного в соседней ячейке декомпозиции через смежную грань. Мы предполагаем, что макроразбиение является согласованным.

На непустом множестве $\Omega \subset R^3$ рассмотрим конечное объединение подмножеств $M_h(\Omega) = \bigcup_i K_i$ и пространство $\mathfrak{Z}_n(K_i)$ полиномов степени n . На объединении $M_h(\Omega)$ введём дискретные функциональные пространства для аппроксимации давления и скорости:

$$P^h = \left\{ p^h \mid p^h \in L_0^2(\Omega) : p^h \in \mathfrak{Z}_{n-1}(K_i) \forall K_i \in M_h(\Omega), \int_{K_i} p^h dK_i = 0 \right\}, \quad (11)$$

$$\mathbf{V}^h = \left\{ \mathbf{v}^h \mid \mathbf{v}^h \in \mathbf{H}_0(\text{div}, \Omega) : \mathbf{v} \in [\mathfrak{Z}_n(K_i)]^3 \forall K_i \in M_h(\Omega), \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \Big|_{\partial K_i} = 0 \right\}. \quad (12)$$

На множестве $\Gamma = \bigcup_i \partial K_i$ определим пространство следов $\text{Tr}(\Gamma) = \prod_{\Omega_i \in M_h(\Omega)} L^2(\partial K_i)$. Обозначим

через $\Gamma_0 = \Gamma \setminus \partial\Omega$ множество внутренних границ. Следы неоднозначных функций на межфрагментарных границах удобно выражать через среднее $\{\cdot\}$ и скачок $[\cdot]$. Для функций $\mathbf{v} \in [\text{Tr}(\Gamma)]^3$, $p \in \text{Tr}(\Gamma)$ and $T \in \text{Tr}(\Gamma)$ среднее $\{\cdot\}$ и скачок $[\cdot]$ на внешних границах $\partial\Omega$ определяются как:

$$\begin{aligned} [\underline{\mathbf{v}}]_{\partial\Omega} &= \mathbf{v} \otimes \mathbf{n}, \quad [\mathbf{v}]_{\partial\Omega} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}, \quad \{\mathbf{v}\}_{\partial\Omega} = \mathbf{v}, \\ [p]_{\partial\Omega} &= p\mathbf{n}, \quad \{p\}_{\partial\Omega} = p, \quad [T]_{\partial\Omega} = T\mathbf{n}, \quad \{q\}_{\partial\Omega} = T, \end{aligned} \quad (13)$$

на внутренних границах $\Gamma_0 = \partial K_i \cap \partial K_j$:

$$\begin{aligned} [\underline{\mathbf{v}}]_{\Gamma_0} &= \mathbf{v}_i \otimes \mathbf{n}_i + \mathbf{v}_j \otimes \mathbf{n}_j, \quad [\mathbf{v}]_{\Gamma_0} = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_i + \mathbf{v}_j \cdot \mathbf{n}_j, \quad \{\mathbf{v}\}_{\Gamma_0} = (\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_j) / 2, \\ [p]_{\Gamma_0} &= p_i \mathbf{n}_i + p_j \mathbf{n}_j, \quad \{p\}_{\Gamma_0} = (p_i + p_j) / 2, \\ [T]_{\Gamma_0} &= T_i \mathbf{n}_i + T_j \mathbf{n}_j, \quad \{T\}_{\Gamma_0} = (T_i + T_j) / 2. \end{aligned} \quad (14)$$

Вариационная формулировка для задачи Стокса-Дарси на базе разрывного метода Галёркина имеет вид: найти такие $\mathbf{v}_1^h \in \mathbf{V}^h$, $p_1^h \in P^h$, $p_2^h \in P^h$, что $\forall \mathbf{w}_1^h \in \mathbf{V}^h$, $q_1^h \in P^h$ и $q_2^h \in P^h$

$$\begin{aligned} a_1(\mathbf{w}_1^h, \mathbf{v}_1^h) + b(\mathbf{w}_1^h, p_1^h) + \Lambda(\mathbf{w}_1^h, p_2^h) &= (\mathbf{w}_1^h, \mathbf{F}), \\ -b(\mathbf{v}_1^h, q_1^h) + d(q_1^h, p_1^h) &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$a_2(p_2^h, q_2^h) + \Lambda(\mathbf{v}_1^h, q_2^h) = (q_2^h, f),$$

$$\begin{aligned} a_1(\mathbf{w}_1^h, \mathbf{v}_1^h) &= \sum_K \int_{\Omega_K} \mu \left((\nabla \mathbf{v}_1^h)^T + \nabla \mathbf{v}_1^h \right) : \nabla \mathbf{w}_1^h + \sum_{\Gamma_K \in \Gamma_{12}} \int_{\Gamma_K} \frac{\mu}{m} (\mathbf{v}_1^h \cdot \boldsymbol{\tau}_{12}) (\mathbf{w}_1^h \cdot \boldsymbol{\tau}_{12}) dS - \\ &- \sum_K \int_{\partial\Omega_K} \left\{ \mu \left((\nabla \mathbf{v}_1^h)^T + \nabla \mathbf{v}_1^h \right) \right\} : [\underline{\mathbf{w}_1^h}] + \left\{ \mu \left((\nabla \mathbf{v}_1^h)^T + \nabla \mathbf{w}_1^h \right) \right\} : [\underline{\mathbf{v}_1^h}] - \tau_1^{DG} [\underline{\mathbf{v}_1^h}] : [\underline{\mathbf{w}_1^h}] dS, \end{aligned} \quad (16)$$

$$b(\mathbf{v}_1^h, q_1^h) = - \sum_K \int_{\Omega_K} \nabla \cdot \mathbf{v}_1^h q_1^h d\Omega_K + \sum_K \int_{\partial\Omega_K} \{q_1^h\} [\mathbf{v}_1^h] dS, \quad (17)$$

$$\Lambda(\mathbf{w}_1^h, p_2^h) = \sum_{\Gamma_K \in \Gamma_{12}} \int_{\Gamma_K} p_2^h (\mathbf{w}_1^h \cdot \mathbf{n}_{12}) dS, \quad (18)$$

$$(\mathbf{w}^h, \mathbf{F}) = \sum_K \int_{\Omega_K} \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{w}^h d\Omega_K + \sum_{\Gamma_K \in S_{inlet}} \int_{\Gamma_K} \mathbf{t}_{inlet} \cdot \mathbf{w}^h dS + \sum_{\Gamma_K \in S_{outlet}} \int_{\Gamma_K} \mathbf{t}_{outlet} \cdot \mathbf{w}^h dS, \quad (19)$$

$$d(q_1^h, p_1^h) = \sum_{\Gamma_K \in \Gamma_0} \tau_2^{DG} \int_{\Gamma_K} [q_1^h] \cdot [p_1^h], \quad (20)$$

$$a_2(p_2^h, q_2^h) = \sum_K \int_{\Omega_K} \frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla p_2^h \cdot \nabla q_2^h d\Omega_K + \sum_{\Gamma_K \in \Gamma_{12}} \int_{\Gamma_K} (\mathbf{v}_2^h \cdot \mathbf{n}_{12}) q_2^h dS - \\ - \sum_K \int_{\partial\Omega_K} \left\{ \frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla p_2^h \right\} \cdot [q_2^h] + \left\{ \frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla q_2^h \right\} : [p_2^h] - \tau_2^{DG} [p_2^h] \cdot [q_2^h] dS. \quad (21)$$

$$(q_2^h, f) = \sum_K \int_{K \in S_{outlet}} \mathbf{t}_{outlet} \cdot \mathbf{n} q_2^h + \frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \mathbf{t}_{outlet} \nabla q_2^h + \tau_2^{DG} \mathbf{t}_{outlet} \cdot \mathbf{n} q_2^h dS + \\ + \sum_K \int_{K \in S_{inlet}} \mathbf{t}_{inlet} \cdot \mathbf{n} q_2^h + \frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \mathbf{t}_{inlet} \nabla q_2^h + \tau_2^{DG} \mathbf{t}_{inlet} \cdot \mathbf{n} q_2^h dS. \quad (22)$$

Единственность решения задачи Стокса-Дарси также определяется подходящим выбором триплета базисов для пространственной аппроксимации вектора скорости и полей давления. Для аппроксимации вектора скорости мы используем базис полного второго порядка пространства $\mathbf{H}_0(\text{div}, \Omega)$. Для аппроксимации полей давления используется иерархический базис первого порядка пространства $H^1(\Omega)$.

Мы рассматриваем течение несжимаемой жидкости (вода) при перепаде давления по высоте образца в 1 Атм. Результаты решения данной задачи в трёх ячейках глобальной декомпозиции показаны на рисунке 3.

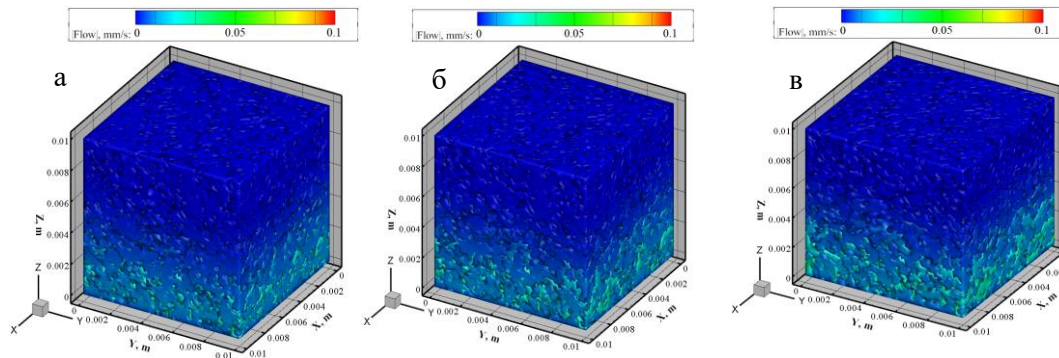


Рис. 3. Модуль скорости течения жидкости:

а – пористость 5%, б – пористость 7%, в – пористость 9%

Расчёты выполнены при использовании процессора AMD Ryzen 9 3950X 16-Core Processor 3.49 GHz, 64 Гб ОП, ОС Windows 10 (x64). Распараллеливание алгоритма выполнено при использовании технологии OpenMP. В таблице 3 отражено время решения полномасштабной задачи при использовании разных схем декомпозиции и числа потоков, а также погрешность численного решения. Под погрешностью решения δ мы понимаем величину:

$$\delta = \frac{\|\langle \mathbf{v} \rangle - \langle \mathbf{v} \rangle^*\|_{\mathbf{H}(\text{div}, \Omega)}}{\|\langle \mathbf{v}^* \rangle\|_{\mathbf{H}(\text{div}, \Omega)}} \cdot 100\%, \quad (23)$$

где $\langle \mathbf{v} \rangle$ – усреднённая скорость течения, вычисленная при использовании метода декомпозиции области с регулярным согласованным сеточным разбиением, $\langle \mathbf{v} \rangle^*$ – усреднённая скорость течения, вычисленная без декомпозиции области (использовано согласованное микромасштабное тетраэдрическое разбиение).

Таблица 3

Затраты вычислительных ресурсов и погрешность

	2 потока		4 потока		8 потоков		16 потоков	
	Время, с	δ , %	Время, с	δ , %	Время, с	δ , %	Время, с	δ , %
8 макроэлементов	4320	9.3e-10	2735	4.2e-10	1938	1.9e-10	691	8.9e-10
64 макроэлемента	2308	7.6e-9	1342	3.1e-9	731	7.3e-9	405	5.3e-9
512 макроэлементов	1193	2.7e-8	743	9.2e-8	401	1.1e-9	227	9.1e-9

Заключение

Многомасштабное численное моделирование физических процессов в геологических породах состоит из следующих этапов:

- построение дискретной геометрической модели изучаемого объекта в зависимости от выбранного масштаба и природы физических процессов;
- выбор подходящих континуальных и феноменологических моделей физических процессов в зависимости от рассматриваемого масштаба, структурных особенностей изучаемого объекта и его физических свойств;
- выбор метода дискретизации математических моделей с учётом особенностей решаемых задач.

Для ускорения алгоритмов численного моделирования физических процессов целесообразно применять иерархические сеточные аппроксимации и неконформные многомасштабные конечно-элементные методы. Многомасштабность может быть, как геометрической (применение иерархических сеточных дискретизаций), так и функциональной (на уровне построения специального функционального пространства решения).

В данной работе была продемонстрирована эффективность предложенного алгоритма построения иерархической сеточной модели, а также вариант метода декомпозиции области для решения задачи о течении однофазной жидкости в многомасштабной пористой среде на примере цифровой модели образца песчаника. Приведённые результаты вычислительных экспериментов показали масштабируемость алгоритмов, а также их естественный параллелизм: алгоритмы имеют почти оптимальный баланс вычислительной нагрузки и минимальный расход ресурсов при обмене данными между подобластями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта РАН FWZZ-2022-0030 (задача о многомасштабном численном моделировании потока жидкости в пористых средах).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schrefler B.A., Boso D.P., Pesavento F. Mathematical and numerical multi-scale modelling of multiphysics problems // Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. 2011. Vol. 18. P. 91-113.
2. Farias A. M., Devloo P. R. B., Gomes S. M., & Durán O. An object-oriented framework for multiphysics problems combining different approximation spaces // Finite Elements in Analysis and Design. 2018. Vol. 151. P. 34-49.
3. Maltsev V., Yuan D., Jenkins K.W., et al. Hybrid discontinuous Galerkin-finite volume techniques for compressible flows on unstructured meshes // Journal of Computational Physics. 2023. Vol. 473. Article ID 111755.
4. Tsoutsanis P., Dumbser M. Arbitrary high-order central non-oscillatory schemes on mixed-element unstructured meshes // Computer and Fluids. 2021. Vol. 225. Article number 104961.
5. Veiga L.B., Brezzi F., Cangiani A., Manzini G., Marini L.D., and Russo A. Basic principles of virtual element methods // Math. Models Methods Appl. Sci. 2013. Vol. 23(1). P. 199-214.
6. Mengolini M., Benedetto M.F., Aragón A.M. An engineering perspective to the virtual element method and its interplay with the standard finite element method // Comp. Meth. in App. Mech. and Eng. 2019. Vol. 350. P. 995-1023.
7. Brun M.K., Ahmed E., Nordbotten J. M., and Stenseth N.C. Modeling the Process of Speciation Using a Multiscale Framework Including A Posteriori Error Estimates // SIAM Journal on Applied Mathematics. 2022. Vol. 82, Iss. 2. P. 450-475.
8. Weinan E. Principles of Multiscale Modeling. Cambridge University Press. 2011. 488 p.
9. Epov M.I., Shurina E.P., Itkina N.B., Kutishcheva A.Y., Markov S.I. Finite element modeling of a multi-physics poro-elastic problem in multiscale media // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2019. Vol. 352. P. 1-22.

Марков Сергей Игоревич

Доцент каф. Вычислительных технологий, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, зав. лаб. Математического моделирования многофизических процессов в нативных и искусственных многомасштабных гетерогенных средах, ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Эл. почта: www.sim91@list.ru

Штанько Екатерина Игоревна

Старший научный сотрудник, Институт Нефтегазовой Геологии и Геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3, ORCID 0000-0001-5214-6106
Тел.: +7-913-953-36-10
Эл. почта: mik_kat@ngs.ru

Иткина Наталья Борисовна

Доцент каф. Вычислительных технологий, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, с.н.с. лаб. Анализа и оптимизации нелинейных систем, Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, Эл. почта: itkina.nat@yandex.ru

Кутищева Анастасия Юрьевна

Доцент каф. Геофизических систем, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, с.н.с. лаб. Математического моделирования многофизических процессов в нативных и искусственных многомасштабных гетерогенных средах, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, Эл. почта: kutischevaay@ipgg.sbras.ru

Добролюбова Дарья Владимировна

Научный сотрудник, Институт Нефтегазовой Геологии и Геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3, ORCID 0000-0002-4577-7310
Тел.: +7-905-934-04-27
Эл. почта: dobroluybovadv@ipgg.sbras.ru

Шурина Элла Петровна

Профессор каф. Вычислительных технологий, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, г.н.с. лаб. Математического моделирования многофизических процессов в нативных и искусственных многомасштабных гетерогенных средах, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, Эл. почта: shurina@online.sinor.ru

S.I. MARKOV, A.YU. KUTISHCHEVA, E.I. SHTANKO, D.V. DOBROLIUBOVA, N.B. ITKINA, E.P. SHURINA

PARALLEL METHODS FOR SOLVING MULTIPHYSICS PROBLEMS IN GEOPHYSICAL APPLICATIONS

Many phenomena around us are characterized by a complex interaction of different physical processes. The multiphysics problem is a mathematical formalization of this interaction, which consists of a system of differential equations, initial and boundary conditions, and conjugate conditions of physical fields. The problem is that each mathematical model in the segregated consideration can be correctly approximated by a certain approach. Most of the currently available numerical simulation tools are tailored to a specific numerical model, so we have to resort to combining different schemes based on operator splitting. For applied geophysical problems, such a strategy does not always lead to physically relevant results of numerical simulation, since the rock has a multiscale structure and contrasting properties. Our team has accumulated experience in solving problems of this class. We propose to apply computational schemes of multiscale nonconformal finite element methods using hierarchical mesh models. The first level of the hierarchy, the symplectic microgrid model, takes into account all structural features of the object under study. Then the microscale mesh is factorized and a macroscale polyhedral mesh partition is constructed, each element of which is a carrier of a local solution of the problem. Mathematical models of physical models at each scale may differ, and the connection between scales is realized within the framework of methods of the theory of effective media and by numerical determination of shape functions. Thus, multiscale can be both geometric and functional. The proposed decomposition of the multi-physics problem allows asynchronous parallel solution of subtasks, and the method of factorization of microscale symplectic partitioning is determined only by the condition of weighted distribution of subtasks over the nodes of the computational system. On the example of different classes of applied problems of geophysics, the possibilities of the proposed approach are demonstrated, the costs of computational resources are analyzed and the results are compared with classical generally accepted methods of solution.

Keywords: *multiphysics problem, multiscale mathematical simulation, nonconformal finite element methods.*

REFERENCES

1. Schrefler B.A., Boso D.P., Pesavento F. Mathematical and numerical multi-scale modelling of multiphysics problems. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 2011. Vol. 18. P. 91-113.

2. Farias A.M., Devloo P.R.B., Gomes S.M., & Durán O. An object-oriented framework for multiphysics problems combining different approximation spaces. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2018. Vol. 151. P. 34-49.
3. Maltsev V., Yuan D., Jenkins K.W., et al. Hybrid discontinuous Galerkin-finite volume techniques for compressible flows on unstructured meshes. *Journal of Computational Physics*. 2023. Vol. 473. Article ID 111755.
4. Tsoutsanis P., Dumbser M. Arbitrary high-order central non-oscillatory schemes on mixed-element unstructured meshes. *Computer and Fluids*. 2021. Vol. 225. Article ID 104961.
5. Veiga L.B., Brezzi F., Cangiani A., Manzini G., Marini L.D., and Russo A. Basic principles of virtual element methods. *Math. Models Methods Appl. Sci.* 2013. Vol. 23(1). P. 199-214.
6. Mengolini M., Benedetto M.F., Aragón A.M. An engineering perspective to the virtual element method and its interplay with the standard finite element method. *Comp. Meth. in App. Mech. and Eng.* 2019. Vol. 350. P. 995-1023.
7. Brun M.K., Ahmed E., Nordbotten J.M., and Stenseth N.C. Modeling the Process of Speciation Using a Multiscale Framework Including A Posteriori Error Estimates. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 2022. Vol. 82, Iss. 2. P. 450-475.
8. Weinan E. Principles of Multiscale Modeling. *Cambridge University Press*. 2011. 488 p.
9. Епов М.И., Шурина Е.П., Иткина Н.Б., Кутищева А.Ю., Марков С.И. Finite element modeling of a multi-physics poro-elastic problem in multiscale media. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2019. Vol. 352. P. 1-22.

Sergey I. Markov

Header of the Laboratory for Mathematical Modeling of Multi-Physical Processes in Native and Artificial Multiscale Heterogeneous Media, The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Koptug ave., Novosibirsk, 630090, Russia
Associate Professor at the Department of Computational Technologies, Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, Russia, 630073,
E-mail: www.sim91@list.ru

Anastasiya Yu. Kutishcheva

Researcher, Laboratory for Mathematical Modeling of Multi-Physical Processes in Native and Artificial Multiscale Heterogeneous Media, The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Koptug ave., Novosibirsk, Russia, 630090,
Associate Professor at the Department of Geophysical systems, Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia,
E-mail: kutischevaay@ipgg.sbras.ru

Daria V. Dobrolubova

Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), 3, Koptug ave. Novosibirsk, Russia, 630090
Assistant at the Department of Computational Technologies, Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, Russia, 630073,
E-mail: dobrolubovadv@ipgg.sbras.ru

Ekaterina I. Shtanko

Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS),
3, Koptug ave. Novosibirsk, Russia, 630090
E-mail: mik_kat@ngs.ru

Natalya B. Itkina

Assistant Professor at the Department of Computational Technologies,
Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia,
Senior Researcher, Laboratory for Analysis and Optimization of Nonlinear Systems,
Institute of Computational Technologies SB RAS,
6, Academician M.A. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, Russia, 630090,
E-mail: itkina.nat@yandex.ru

Ella P. Shurina

Professor at the Department of Computational Technologies, Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, Russia, 630073,
Chief Researcher, Laboratory for Mathematical Modeling of Multi-Physical Processes in Native and Artificial Multiscale Heterogeneous Media, The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Koptug ave., Novosibirsk, Russia, 630090,
E-mail: shurina@online.sinor.ru

АНАЛИЗ И ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ ПРОТОКОЛА ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК АУНИ В КВАНТОВОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ КЛЮЧЕЙ

В статье приводится исследование модифицированного варианта протокола АУНИ, ориентированного на снижение его вычислительной сложности в системах квантового распределения ключей (КРК). В связи развитием квантовых технологий, была поставлена задача добиться меньшего числа операций, требуемых для исправления ошибок в ключевом материале относительного известного варианта реализации данного протокола. Для анализа производилось эмпирическое исследование с применением программно-реализованных моделей. Результаты показали, что снижение вычислительной нагрузки возможно за счет увеличения доли отбрасываемого ключевого материала в процессе согласования. При этом продемонстрирована актуальность вопроса эффективной имплементации алгоритма, отсутствие которой приводит к увеличению числа отказов протокола с увеличением уровня квантовых ошибок. Обсуждаются пути и перспективы решения обозначенной проблемы.

Ключевые слова: квантовая криптография, квантовое распределение ключей, ключевой материал, исправление ошибок, АУНИ.

1. Введение

Квантовое распределение ключей состоит из двух этапов: квантовой фазы и фазы постобработки. В квантовой фазе по оптическому каналу передаются фотонные импульсы, на основе которых формируются предварительные ключевые последовательности [1–5]. Однако при передаче квантовых состояний неизбежны ошибки, вызванные шумом канала и потенциальным вмешательством злоумышленника [6, 7], поэтому этап постобработки – включающий просеивание, исправление ошибок и усиление секретности является неотъемлемой частью любой практической системы КРК.

Исправление ошибок производится непосредственно после просеивания ключевой последовательности. Протокол АУНИ является одним из протоколов исправления ошибок, вследствие применения которого у Алисы и Боба ключевой материал становится идентичным, то есть согласованным [8]. В работе [8] для данного протокола были описаны три варианта, отличающиеся друг от друга долей отбрасываемого ключевого материала в процессе исправления ошибок, а также вычислительной сложностью. Третий вариант протокола представляет собой компромиссное решение относительно первых двух по вышеуказанным характеристикам, однако авторы не предложили конкретного способа его реализации, а также не произвели сравнительного исследования вариантов в условиях формализованного вычислительного эксперимента.

В данной статье приводится описание оригинальной имплементации компромиссного варианта протокола АУНИ, а также ее комплексное сравнение с простейшим вариантом протокола, являющимся наиболее вычислительно сложным [8], по нескольким показателям: среднее количество вызовов хэш-функции (проверенных e'), частота отказов (англ. Frame Error Rate, FER), а также среднее время выполнения протокола исправления.

2. Варианты протокола

2.1. Локальная свобода от коллизий

Вне зависимости от варианта исполнения протокола принципиальным аспектом для реализации модели постобработки с применением протокола АУНИ является применение в его работе хэш-функций со свойством локальной свободы от коллизий [8, 9]. В оригинальной работе [8] использовалась современная на тот момент криптографическая хэш-функция MD5, которая на сегодняшний день является устаревшей. В связи с этим, используя аналогичную [8] процедуру мы показали локальную свободу от коллизий для современных криптографических хэш-функций SHA3-256 и Стрибог-256.

В качестве иллюстрации локальной свободы от коллизий на рисунке 1 представлен график частоты встречаемости того или иного значения расстояния Хэмминга (то есть количества различий в битовых строках) между хэш-значениями, полученными из исходных строк, различающихся

на 1, 10 или 20 битов соответственно. По графику видно, что изменение любого количества битов в строке на входе хэш-функции приводит к изменению в среднем половины битов на её выходе.

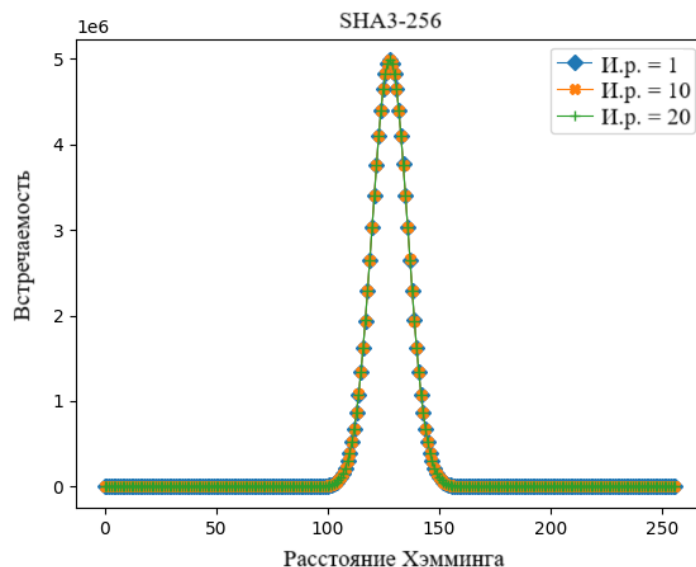


Рис. 1. Расстояние Хэмминга между выходами хэш-функции SHA3-256 для различного числа отличающихся битов на её входе

2.2. Простейший вариант АУНІ

Подробный разбор принципа и анализ алгоритмов исправления ошибок в вариантах АУНІ произведён в работе [9]. Здесь приводится формализованное описание простейшего варианта АУНІ, который является отправной точкой для обоснования предложенной реализации.

Простейший протокол осуществляется следующим образом. Пусть последовательность Алисы состоит из двух блоков r_1 и r_2 с длинами n и k соответственно. Предполагается, что k должно быть равным длине выхода выбранной в последствии хэш-функции. Аналогичным образом, последовательность Боба также представлена двумя блоками тех же длин $r_1 \oplus e_1$ и $r_2 \oplus e_2$, где строки e_1 и e_2 представляют собой битовые карты ошибок в двух фрагментах принятой по квантовому каналу последовательности.

Алиса отправляет Бобу по открытому каналу сообщение $H(r_1) \oplus r_2$, где $H(\cdot)$ – хэш-функция с локальной свободой от коллизий. На своей стороне Боб производит следующие вычисления:

$$(H(r_1) \oplus r_2) \oplus (r_2 \oplus e_2) = H(r_1) \oplus e_2.$$

Теперь задача Боба сводится к перебору всех реалистичных варианты e' до тех пор, пока он не получит значение, которое бы удовлетворяло следующему неравенству:

$$d(H(r_1) \oplus e_2, H(r_1 \oplus e_1 \oplus e')) < k \cdot \frac{QBER + \alpha}{2}, \quad (1)$$

где α – некоторая константа, которая может быть определена эмпирически; $d(\cdot)$ – функция, возвращающая расстояние Хэмминга между двумя входными строками.

Наконец, когда Боб найдет подходящую e' , он вычислит $r_1 \oplus e_1 \oplus e'$, тем самым согласовав строку r_1 – общий ключевой материал без ошибок.

2.3. Снижение вычислительной сложности

Допустим последовательность Алисы состоит из четырех блоков r_1, r_2, r_3 и r_4 длинами $n/2, n/2, n/2$ и k соответственно. Тогда аналогичная последовательность на стороне Боба, полученная после обмена по квантовому каналу тоже представлена четырьмя блоками $r_1 \oplus e_1, r_2 \oplus e_2, r_3 \oplus e_3$ и $r_4 \oplus e_4$, где строки e_1, e_2, e_3 и e_4 все также представляют собой битовые карты ошибок.

Далее в рамках протокола, Алиса передает Бобу по открытому каналу два сообщения $H(r_1 r_2) \oplus r_4$ и $r_1 \oplus r_2 \oplus r_3$, $H(\cdot)$ – локально свободная от коллизий хэш-функция, $r_1 r_2$ – конкатенация двух первых блоков Алисы.

Затем Боб производит следующие вычисления, используя полученные от Алисы строки:

$$H(r_1 r_2) \oplus r_4 \oplus (r_4 \oplus e_4) = H(r_1 r_2) \oplus e_4,$$

$$r_1 \oplus r_2 \oplus r_3 \oplus (r_1 \oplus e_1) \oplus (r_2 \oplus e_2) \oplus (r_3 \oplus e_3) = e_1 \oplus e_2 \oplus e_3.$$

Аналогично предыдущему варианту протокола задача Боба теперь состоит в том, чтобы подобрать такую строку $e_1' e_2'$ длиной n , которая бы удовлетворяла следующему выражению:

$$r_1 r_2 \oplus e_1 e_2 \oplus e_1' e_2' = r_1 r_2,$$

такая последовательность, очевидно, удовлетворит неравенству, аналогичному (1):

$$d(H(r_1 r_2) \oplus e_4, H(r_1 r_2 \oplus e_1 e_2 \oplus e_1' e_2')) < k \cdot \frac{QBER + \alpha}{2}. \quad (2)$$

На данном этапе задача сводится к алгоритмизации перебора вариантов $e_1' e_2'$. Боб располагает информацией о $e_1 \oplus e_2 \oplus e_3$ и может её использовать в качестве подсказки. Для начала примем, что две строки $e_{12}' = e_1' \oplus e_2'$ и e_3' не имеют единичных битов в одних и тех же позициях. В таком случае e_3' может содержать любое количество единичных битов, представленных в $e_{12} \oplus e_3$, где $e_{12} = e_1 \oplus e_2$. Принимая во внимание что $n/2$ не велико, такой случай перебора не представляет существенной сложности. Максимальное число вариантов e_3' составит

$$N(q) = 2^q, \quad (3)$$

где q – число единичных битов в $e_1 \oplus e_2 \oplus e_3$.

На следующем шаге, для каждого из вариантов e_3' и, соответственно, e_{12}' , Боб производит аналогичный перебор допустимых вариантов e_1' и e_2' . Если e_1' и e_2' опять же не имеют единичных битов в одних и тех же позициях, такой перебор, с учётом (3) уже будет предполагать проверку следующего максимального числа вариантов:

$$N(q) = 3^q.$$

В более общем случае, когда допускается возможность того, что единичные биты присутствуют на одних и тех же позициях в e_{12} и в e_3' , задача перебора существенно усложняется. В [10] предлагается называть такие комбинации битовых строк «коллизиями». В случае допущения о наличии K коллизий, число вариантов e_3' для перебора составит

$$N(K, q) = C_{n-q}^K \cdot 2^q. \quad (4)$$

Очевидно, что максимальное число вариантов e_{12}' комплиментарных к e_3' также составит (4), однако для каждой частной e_{12}' будет также актуальна проблема коллизий при переборе e_1' и e_2' .

Исходя из этого, предлагается следующий вариант перебора для поиска $e_1' e_2'$. Выбираются два числа X и X' – глубины поиска e_2' и e_3' соответственно. Затем происходит перебор всех возможных e_3' по вышеописанному принципу, предполагая, что коллизий не было вовсе. Для каждой e_3' определяется комплиментарная ей e_{12}' . Для каждой e_{12}' производится перебор возможных пар e_1' и e_2' с учётом возможности того, что имели место от 1 до X коллизий. Перебор останавливается в том случае, если неравенство (2) было удовлетворено.

Если неравенство (2) не было удовлетворено ни одним из проверенных вариантов, производится повторный поиск, но уже с предположением, что в $e_{12} \oplus e_3$ могло произойти от 1 до X' коллизий. Для каждого из достижимых значений числа коллизий определяется пара e_3' и e_{12}' , после чего производится перебор возможных вариантов e_1' и e_2' в соответствии с процедурой, описанной ранее.

2.4. Постановка и проведение эксперимента

Для подтверждения гипотезы о снижении вычислительной сложности исправления ошибок с помощью предложенного варианта (АУНІ3) было проведено следующее сравнение с простейшим вариантом реализации (АУНІ2) при вариации следующих параметров:

- значений QBER от 0,01 до 0,11 с шагом 0,01;
- длины n согласуемого блока на выходе протокола в 10 и 30 битов;
- глубин поиска X от 0 до 4 с шагом 1, X' от 0 до 2 с шагом 1.

Некоторые графики зависимостей среднего количества проверенных e_1, e_2 (для простейшего варианта – e), а также уровня FER представлены далее на рисунках 2-5. В рамках вычислительного эксперимента согласование ключевой последовательности производилось 1000 раз, затем результаты усреднялись.

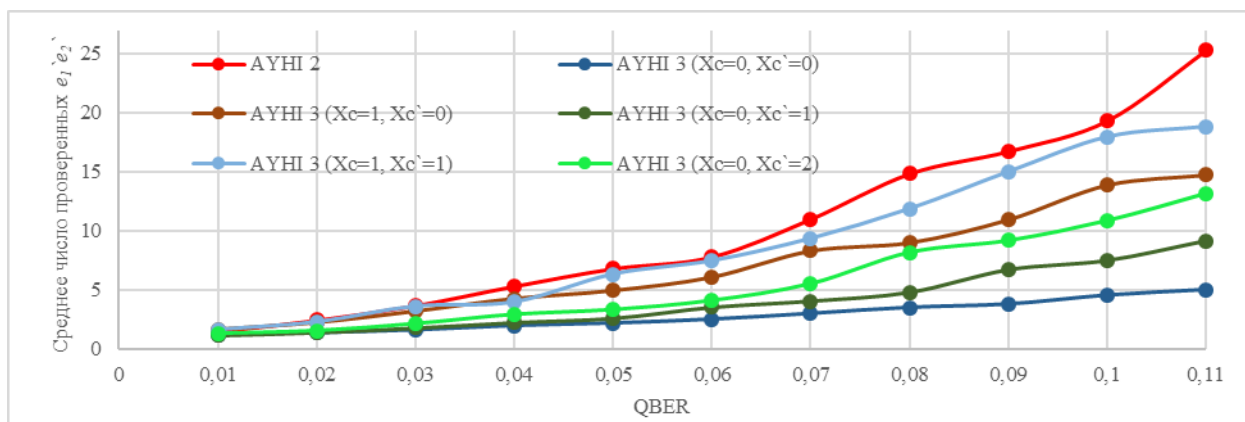


Рис. 2. График зависимости числа проверенных пар e_1, e_2 от QBER при $n = 10$ бит

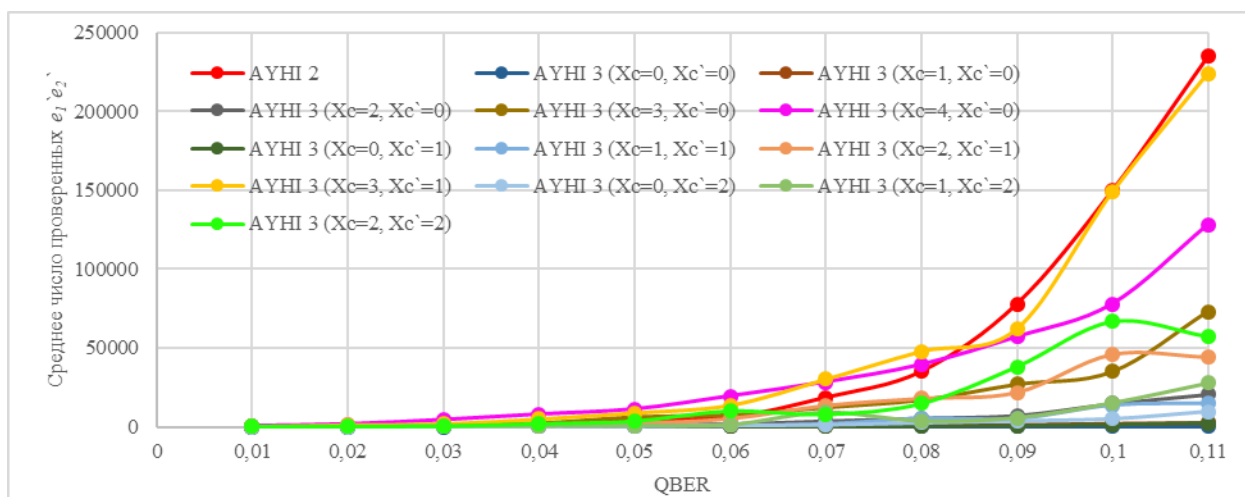


Рис. 3. График зависимости числа проверенных пар e_1, e_2 от QBER при $n = 30$ бит

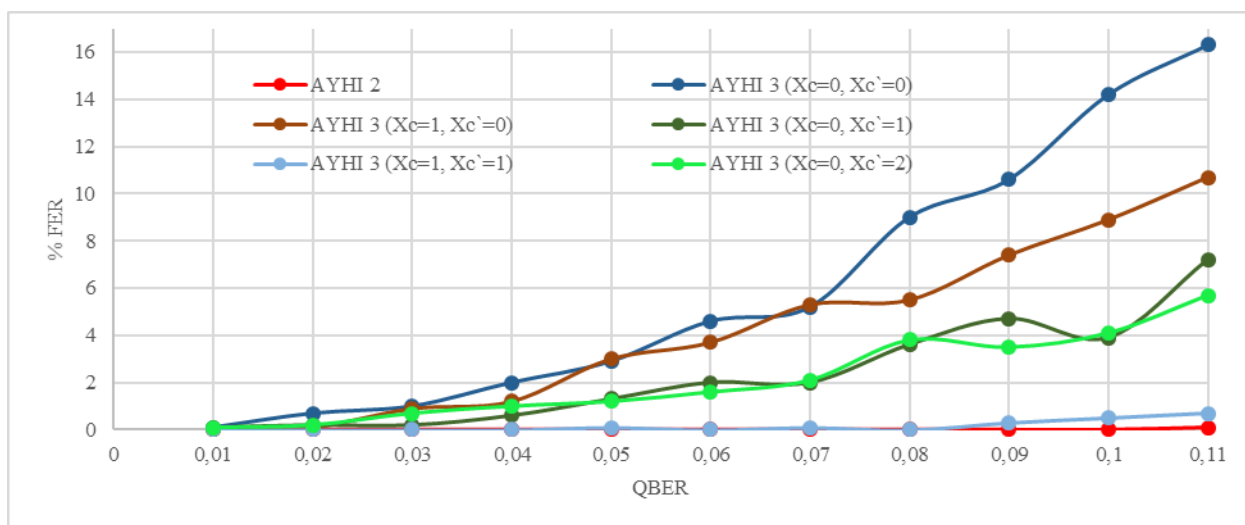
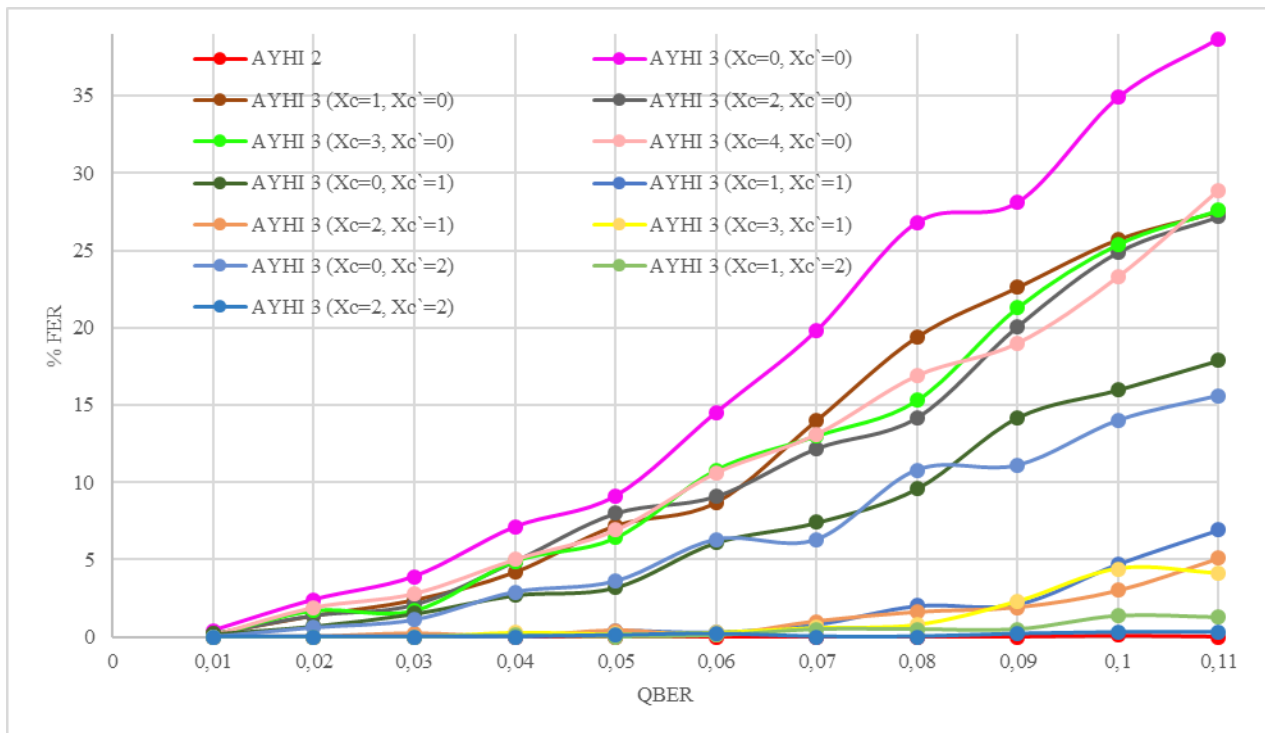


Рис. 4. График зависимости FER от QBER при $n = 10$ бит

Рис. 5. График зависимости FER от QBER при $n = 30$ бит

4. Интерпретация результатов и выводы

Как видно по полученным графикам предложенная имплементация АУНІЗ, а именно перебора $e_1' e_2'$, действительно снижает среднее вызовов хэш-функции по сравнению с АУНІ2, необходимое для исправления ошибок в ключевом материале. При этом важно отметить, что преимущество АУНІЗ перед АУНІ2 для большинства конфигураций первого становится более выраженным с увеличением n . В то же время, на рисунках выше представлена не случайная выборка из множества исследованных конфигураций, отличающихся значениями X_c и X_c' , а подмножество конфигураций, демонстрирующих наилучший результат. Наряду с представленными конфигурациями, существуют такие, которые уступают по производительности АУНІ2, например, $X_c = 4$, $X_c' = 2$.

Также стоит отметить большую надежность АУНІ2 по сравнению с АУНІЗ в широком диапазоне QBER, при всех исследованных значениях n . Это связано с тем, что метод имплементации АУНІ2 по своей сути представляет собой полнофакторный перебор, который может быть ускорен при выборе правильной стратегии. Таким образом существует лишь небольшая вероятность не получить такой e' , который не удовлетворит неравенство (1) – в том случае, если число единичных битов в e_2 будет больше, чем $k(\alpha + \epsilon)/2$.

То же в целом справедливо и для АУНІЗ, однако дополнительно существует риск не найти фактические последовательности e_1 , e_2 и e_3 из-за недостаточной глубины поиска, то есть выбора низких X_c и X_c' . Вероятность последнего существенно увеличивается с увеличением QBER, что наглядно отражается в зависимостях на рисунках 4 и 5, в то время как для АУНІ2 показатель FER практически не отличается от 0% для всех исследованных QBER.

Подводя итог, можно сказать, что изначальная цель снижения вычислительной сложности протокола была достигнута. При низких значениях глубины поиска X_c и X_c' протокол показывает, как меньшую вычислительную сложность, по сравнению с АУНІ2, так и удовлетворительные значения FER. Однако проблема надёжности предложенного варианта остаётся актуальной – необходимо усовершенствовать перебор e_1' , e_2' и e_3' , основывающийся на знании Боба о $e_1 \oplus e_2 \oplus e_3$, который повысит надежность и эффективность алгоритмической имплементации относительного нынешней. Стоит сказать, что в следующих работах возможен отход от метода поиска в глубину в пользу каких-либо других вариантов, предполагающих приоритетный перебор априорно более вероятных битовых комбинаций. В то же время, предложенный вариант можно адаптировать к базовому варианту АУНІ (АУНІ1), в котором также применяется метод поиска в глубину [8–10].

В работе представлены материалы доклада на конференции «Высокопроизводительные системы и технологии в научных исследованиях, автоматизации управления и производства», Барнаул, Май 23–24, 2025 г. Исследования производятся при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, в рамках государственного задания по проекту FEWM-2023-0015 (ТУСУР).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Physics of Quantum Information / под ред. Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
2. Assche G. van. Quantum cryptography and secret-key distillation. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
3. Grasselli F. Quantum Cryptography: From Key Distribution to Conference Key Agreement. Cham: Springer International Publishing, 2021.
4. Wolf R. Quantum Key Distribution: An Introduction with Exercises. Cham: Springer International Publishing, 2021. Т. 988.
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // Theoretical Computer Science. 2014. Т. 560. С. 7–11.
6. Васильев Е.И., Фаерман В.А. Дискретно-событийная модель оптического канала системы квантового распределения ключей // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2024. Т. 8, № 1. С. 83–92.
7. Жилев А. и др. Сети квантового распределения ключей в кибербезопасности. Горячая линия - Телеком, 2023. 152 с.
8. Yamamura A., Ishizuka H. Error Detection and Authentication in Quantum Key Distribution // Information Security and Privacy / под ред. Varadharajan V., Mu Y. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. Т. 2119. С. 260–273.
9. Антропов Е.В. и др. Обзор протоколов исправления ошибок Cascade и АУНІ в системах квантового распределения ключей // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2024. Т. 8, № 2. С. 42–57.
10. Gronberg P., Jonsson P. Key reconciliation in quantum key distribution // IEEE Seminar on Quantum Cryptography: Secure Communications. London, UK: IEE, 2005. Т. 2005. С. 14–14.

Антропов Евгений Валерьевич

Студент кафедры Безопасности информационных систем, Томский университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Россия, г. Томск, Ленина пр., д. 40
Эл. почта: antropoff05@gmail.com

Курков Даниил Владимирович

Студент кафедры Безопасности информационных систем, Томский университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Россия, г. Томск, Ленина пр., д. 40
Эл. почта: kurkov_dv@mail.ru

Фаерман Владимир Андреевич

Старший преподаватель кафедры Комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем, Томский университет систем управления и радиоэлектроники, член IEEE
634050, Россия, г. Томск, Ленина пр., д. 40
ORCID: 0000-0002-9643-0245
Тел.: +7-(923)-44-350-44
Эл. почта: fva@fb.tusur.ru

E.V. ANTROPOV, V.A. FAERMAN, D.V. KURKOV

ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF COMPUTATIONAL SCHEMES FOR AIHY KEY RECONCILIATION PROTOCOL IN QUANTUM KEY DISTRIBUTION

The article presents a study of a modified version of the AYHI protocol aimed at reducing its computational complexity in quantum key distribution (QKD) systems. In connection with the development of quantum technologies, the task was set to achieve a smaller number of operations required to correct errors in the key material relative to the simplest version of the implementation of this protocol. For the analysis, comparative methods of empirical software models were used. The results demonstrate that the computational load can be reduced by increasing the proportion of discarded key material during the agreement process. However, insufficient development of the implementation was revealed, which is expressed in a rapidly growing failure rate with an increase in the level of quantum errors (Quantum Bit Error Rate, QBER).

Keywords: quantum cryptography, quantum key distribution, key material, error correction, AYHI.

REFERENCES

1. Physics of Quantum Information. Edited by Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A. *Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*. 2000.
2. Assche G. van. Quantum Cryptography and Secret Key Distillation. *Cambridge: Cambridge University Press*. 2006.
3. Grasselli F. Quantum Cryptography: From Key Distribution to Conference Key Agreement. *Cham: Springer International Publishing*. 2021.
4. Wolf R. Quantum Key Distribution: An Introduction with Exercises. *Cham: Springer International Publishing*. 2021. Vol. 988.
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Flipping. *Theoretical Computer Science*. 2014. Vol. 560. P. 7–11.
6. Vasiliev E.I., Faerman V.A. Discrete-event model of an optical channel quantum distributed key system. *High-performance computing systems and technologies*. 2024. Vol. 8. No. 1. P. 83–92 (in Russian).
7. Zhilyaev A. et al. Quantum key distribution networks in cybersecurity. *Hotline – Telecom*. 2023. 152 p. (in Russian).
8. Yamamura A., Ishizuka H. Error detection and authentication in quantum key distribution. *Information security and privacy. Edited by Varadharajan V., Mu Yu. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, 2001. Vol. 2119. P. 260–273.
9. Antropov E.V. et al. A Review of Cascade and AYHI Error Correction Protocols in Quantum Key Distribution Keys. *High Performance Computing Systems and Technologies*. 2024. Vol. 8. No. 2. P. 42–57 (in Russian).
10. Gronberg P., Jonsson P. Key Agreement in Quantum Key Distribution. *IEE Workshop on Quantum Cryptography: Secure Communications. London, UK: IEE*. 2005. Vol. 2005. P. 14–14.

Evgeny V. Antropov

Student, Department of Security of Information Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics,
40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia.
E-mail: antropoff05@gmail.com

Daniil V. Kurkov

Student, Department of Security of Information Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics,
40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia.
E-mail: kurkov_dv@mail.ru

Vladimir A. Faerman

Senior lecturer, Department of Complex
Information Security of Computer Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics, IEEE member,
40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia.
ORCID: 0000-0002-9643-0245
Phone: +7-(923)-44-350-44
E-mail: fva@fb.tusur.ru

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ТЕКСТОВЫХ СООБЩЕНИЙ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИ БЛИЗКИХ СЛОВ

На основе математического аппарата обработки текста на естественном языке в работе проведено сравнение текстов, полученных при ответе учащихся на контрольные вопросы и текстом правильного ответа. Особенностью таких текстовых ответов является использование различных слов и выражений, с помощью которых выражается основная мысль. Поэтому для выделения наиболее информативных слов в тексте привлечен статистический метод TF-IDF. С помощью метода TD-IDF вычислены численные параметры текста, характеризующие частотные характеристики появления информативных слов. Полученные числовые параметры были объединены в общий вектор признаков, описывающий текст. Для сравнения векторов признаков, вычисленных для текстов ответа учащихся и текстом правильного ответа, привлечена мера косинусного сходства. Показано, что на изменение значений косинусного сходства связано с использованием в текстах различных слов для ответа на заданный вопрос. Для нахождения в таких текстах близких по смыслу слов, связанных с правильным ответом, использован математический аппарат дистрибутивной семантики на основе предобученной нейронной сети. Применение этого метода позволило определить в тексте тематически близкие слова. Полученные результаты могут способствовать разработке новых методов автоматической оценки на правильность текстовых ответов учащихся.

Ключевые слова: *обработка текста, дистрибутивная семантика, нейронные сети.*

Введение

Современные технологии в области распознавания речи и обработки текста находят широкое применение в учебных заведениях при создании электронных средств обучения и контроля знаний учащихся. Для создания учебного контента применяются генеративные технологии на основе больших языковых моделей. Использование систем распознавания речи задействуются для интерактивных систем взаимодействия с обучающимися на основе обмена голосовыми сообщениями [1]. Перспективной задачей является разработка программных систем, позволяющих оценивать голосовые ответы обучающихся, полученные при сдаче экзаменов или тестов. Такие системы опираются на совместную работу двух технологий: системы распознавания речи для преобразования записанного голосового ответа обучающегося в машинописный текст и использование алгоритмов обработки текста для оценивания правильности ответа [2]. При этом нахождение надежного математического аппарата, позволяющего сравнивать текстовый ответ обучающегося с подготовленным текстом правильного ответа и производить его дальнейшее оценивание, является сложной задачей в виду использования обучающимся при ответе разнообразных слов и выражений для описания своей мысли.

Существующие подходы к решению задачи сравнения текстов и оценивания на правильность распознанного из голоса текстового ответа обучающегося опираются на методы статистического анализа текста или использование методов машинного обучения [3]. Для выявления информативных слов в текстах применяются алгоритмы «Мешок слов» и статистический метод TF-IDF [4]. Данные методы позволяют получить численные векторы, описывающие частоту встречаемости ключевых слов в тексте, что делает удобным их последующее применение для сравнения текстов. Однако применение этих методов затруднительно при обработке текстов, которые имеют общий смысл, но записанных различными словами. Поэтому для выявления смысловой связи между ответом учащегося и текстом правильного ответа, подготовленным преподавателем используются алгоритмы методов машинного обучения [5]. Таким примером, является привлечение математического аппарата семантического анализа тестов и нейронных сетей, с помощью которых решаются задачи нахождения текстов или групп слов, относящихся к одной теме [6].

Целью данной работы является разработка метода нахождения тематически близких слов в двух текстовых сообщениях с помощью векторного представления слов, полученного при применении предобученной нейронной модели Word2Vec.

Получение и обработка текстовых данных

Для получения текстовых сообщений в настоящей работе были задействованы технологии распознавания речи и обработки текста на естественном языке. Запись голосовых ответов обуча-

ющихся и последующее распознавание присутствующей в них речи было реализовано с помощью программного обеспечения библиотеки для распознавания речи Vosk, как показано на рисунке 1 [7]. Данное программное обеспечение было установлено на отдельном вычислительном сервере и настроено на параллельную обработку голосовых записей. Преобразованный из голосовой записи текст обрабатывался с помощью реализованного нами программного обеспечения. Алгоритм обработки текста состоял из несколько последовательных этапов. На первом этапе выполнялись исключение из текста стоп-слов, приведение оставшихся слов к начальной форме и разбиение слов на триграммы. На втором этапе осуществлялась векторизация текста на основе вычисления статистической меры TF-IDF [8].



Рис. 1. Алгоритм получения и обработки текстовых сообщений

При выполнении векторизации каждому слову из полученных триграмм сопоставлялся набор из двух числовых параметров: TF, характеризующий частоту употребления слова в отдельном предложении, и параметр IDF, описывающий обратную частоту, с которой слово употребляется во всем текстовом сообщении. Таким образом, значения параметров TF и IDF являлись числовой мерой информативности каждого слова в обрабатываемом тексте. Значение произведений этих параметров TF и IDF формировали общий вектор признаков, описывающий текст [8].

Описанный алгоритм вычисления вектора признаков применялся при обработке текстов, полученных при распознавании записанных голосовых ответов учащихся, которые были даны на контрольный вопрос, заданный преподавателем. При обработке голосовых ответов каждая голосовая запись была распознана в текст. Для контрольного вопроса преподавателем был подготовлен правильный текстовый ответ. Полученные тексты ответов обучающихся и правильный ответ преподавателя обрабатывались описанным выше алгоритмом и вычислялись соответствующие вектора признаков.

Для количественной оценки сходства между векторами признаков ответов обучающегося и правильного текстового ответа в работе привлечена мера косинусного сходства *Sim*, вычисленная в виде:

$$Sim = \frac{s \cdot T}{\|s\| \|T\|}$$

где S — вектор коэффициентов, состоящий из параметров TF-IDF, рассчитанных для текста распознанного голосового ответа учащегося, T — вектор признаков, вычисленный для текста правильного ответа, подготовленного преподавателем, а $\|S\|$, $\|T\|$ и « $\cdot$ » — операции вычисления нормы двух векторов и скалярного произведения между ними [4]. Результат вычисления меры косинусного сходства Sim принимал значения, близкие к 1, при полном сходстве текста ответа обучающегося с текстом правильного ответа, созданным преподавателем. Низкое значение косинусного сходства указывало на несовпадение двух сообщений и использование в ответе слов, отличных от правильного ответа, подготовленного преподавателем. Для дополнительного исследования таких текстовых сообщений на наличие слов, имеющих близкий смысл со словами из правильного ответа, в настоящей работе был привлечен математический аппарат дистрибутивной семантики.

В рамках данного подхода в работе использовалась предобученная модель «word2vec-scorpora-300». Эта модель реализована на основе однослойной нейронной сети с линейной функцией активации, обученной на корпусе текстов русского языка. При построении модели нейронная сеть обучается на последовательно выбранных словах, взятых из текстов на естественном языке. В процессе обучения модель сохраняет информацию об контексте употребления слова, изучая его использование вместе с другими словами в текстовом корпусе [9].

Используя данную модель, для каждого слова из ответа учащегося и текста правильного ответа, подготовленного преподавателем, был вычислен числовой вектор, состоящий из 300 числовых значений. Для определения схожести многомерных векторов, полученных для разных слов, но произнесенных в контексте одного вопроса, был привлечен метод главных компонент. Метод главных компонент позволяет представить полученные многомерные вектора в пространстве меньшей размерности, образованном пересечением главных компонент [10]. В новом пространстве каждое слово с соответствующим ему вектором представляется в виде точки. Слова, имеющие близкие многомерные вектора, в этом пространстве меньшей размерности имеют близкое расположение.

Результат проекции на плоскость, образованную двумя первыми главными компонентами ГК1 – ГК2, 50 многомерных векторов, полученных для 25 слов из ответа учащегося на заданный вопрос и 25 слов короткого правильного ответа, подготовленного преподавателем, показан на рисунке 2.

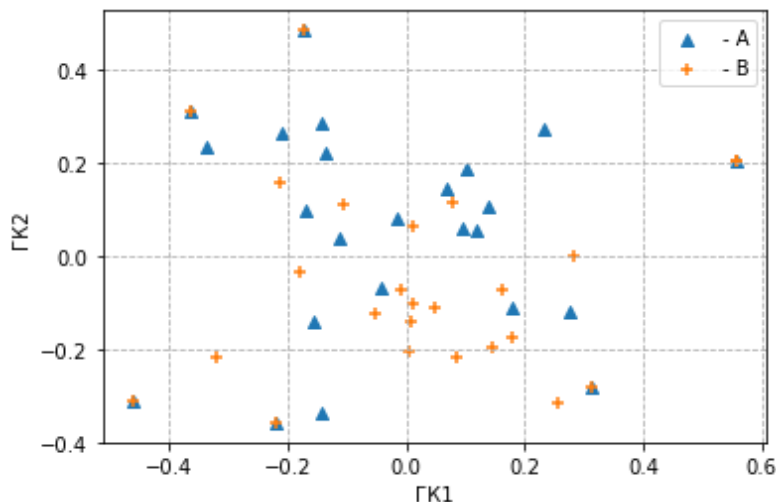


Рис. 2. Проекция многомерных векторов, вычисленных для отдельных слов, на плоскость главных компонент: группа А – проекции векторов слов из ответа учащегося, группа В – проекции векторов слов из текста правильного ответа

Как следует из рисунка 2, точки группы А соответствуют словам, взятым из ответа учащегося, а группа В состоит из точек, описывающих отдельные слова из правильного ответа на вопрос. Наложение точек, принадлежащих разным группам, было связано с тем, что в двух текстах использованы полностью одинаковые слова. Близкое расположение отдельных точек групп А и В указывало на наличие в текстах разных слов, близких по смыслу. Особенностью рисунка 2 являлось наличие пересечения двух групп А и В. Отметим, что подобное положение двух групп А и В

объяснялось тем, что используемые в текстах ответа учащегося и правильного ответа слова использовались для ответа на единый заданный вопрос.

Заключение

В работе описан метод обработки текстовых сообщений, полученных при распознавании ответов учащихся на контрольный вопрос преподавателя. Для оценивания правильности текстовых ответов проведено их сравнение с текстом правильного ответа. Для извлечения необходимых для сравнения текстов информативных характеристик в работе привлечены методы статистического анализа текстов TF-IDF и математический аппарат нейронных сетей. При нахождении тематически близких слов в двух текстовых сообщениях использовано векторное представление слов текстов, полученное с помощью нейронной модели Word2Vec. С помощью метода главных компонент выявлено сходство проекций численных векторов, вычисленных для близких по смыслу слов, произнесённых в одном контексте.

Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для разработки новых методов анализа текстов в прикладных задачах автоматического сравнения текстов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Terzopoulos G., Satratzemi M. Voice assistants and smart speakers in everyday life and in education // Informatics in Education. 2020. Vol. 19, Iss. 3. P. 473-490.
2. Захаров А.А., Захарова И.Г., Шабалин А.М., Ханбеков Ш.И., Джалилзода Д.Б. Интеллектуальный голосовой помощник как пример реализации методологии инклюзивного дизайна // Образование и наука. 2024. Т. 26, № 3. С. 149-175.
3. Бермудес С.Х.Г. Метод измерения семантического сходства текстовых документов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. №3 (188). С. 17-29.
4. Patil S.M., Patil S. Evaluating student descriptive answers using natural language processing // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014. Vol. 3. Iss. 3. P. 1716-1718.
5. Lakshmi V., Ramesh V. Evaluating students' descriptive answers using natural language processing and artificial neural networks (IJERT). 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 3168-3173.
6. Mittal H., Devi M. S. Computerized evaluation of subjective answers using hybrid technique // Innovations in Computer Science and Engineering. 2016. P. 295-303.
7. Беленко М.В., Балахин П.В. Сравнительный анализ систем распознавания речи с открытым кодом // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. №4(58). С. 13-18.
8. Liu M., Yang J. An Improvement of TFIDF Weighting in Text Categorization // International Proceedings of Computer Science Information Technology. 2012. Vol. 47. P. 44-47.
9. Кравченко Ю.А., Мансур А.М., Мохаммад Ж.Х. Векторизация текста с использованием методов интеллектуального анализа данных // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. №2 (219). С. 154-167.
10. Эсбенсен, К. Анализ многомерных данных. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 160 с.

Дмитриев Александр Александрович

К.ф.-м.н., доцент кафедры
информационной безопасности Института
цифровых технологий, электроники и физики,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
656049, Россия, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 61,
Тел.: +7 (3852) 298-199,
Эл. почта: dmitriev@asu.ru

Дмитриев Денис Александрович

Аспирант кафедры
информационной безопасности Института
цифровых технологий, электроники и физики,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
656049, Россия, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 61,
Тел.: +7 (3852) 291-297,
Эл. почта: dmitriev_d_a@vc.asu.ru

A.A. DMITRIEV, D.A. DMITRIEV

DIGITAL PROCESSING OF TEXT MESSAGES TO FIND THEMATICALLY CLOSE WORDS

Based on the mathematical apparatus of natural language text processing, the paper compares the texts obtained from students' answers to test questions and the text of the correct answer. A feature of such text answers is the use of various words and expressions that express the main idea. Therefore, to highlight the most informative words of the text, the statistical method TF-IDF is used in the work. Using the TD-IDF method, numerical parameters of the text characterizing the frequency characteristics of the occurrence of informative words are calculated. The obtained numerical parameters were combined into a common feature vector describing the text. To compare the feature vectors calculated for the texts of students' answers and the text of the correct answer, a measure of cosine similarity is used. It is shown that the change in cosine similarity values is associated with the use of different words in the texts to answer the question. To find

words close in meaning to the correct answer in such texts, the mathematical apparatus of distributive semantics based on a pre-trained neural network is used. The use of this method made it possible to identify thematically close words in the text. The obtained results can contribute to the development of new methods for automatic assessment of the correctness of students' text answers.

Keywords: text processing, distributive semantics, neural networks.

REFERENCES

1. Terzopoulos G., Satratzemi M. Voice assistants and smart speakers in everyday life and in education. *Informatics in Education*. 2020. Vol. 19. Iss. 3. P. 473-490.
2. Zakharov A.A., Zakharova I.G., Shabalin A.M., Khanbekov Sh.I., Dzhililzoda D.B. Intelligent voice assistant as an example of inclusive design methodology implementation. *The Education and science journal*. 2024. Vol. 26. Iss. 3. P. 149-175.
3. Bermudez S.H.G. Method for measuring the semantic-similarity of textual documents. *IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES*. 2017. №3 (188). P. 17-29.
4. Patil S. M., Patil S. Evaluating student descriptive answers using natural language processing. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014. Vol. 3. Iss. 3. P. 1716-1718.
5. Lakshmi V., Ramesh V. Evaluating students' descriptive answers using natural language processing and artificial neural networks. *IJCRT*. 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 3168-3173.
6. Mittal H., Devi M. S. Computerized evaluation of subjective answers using hybrid technique. *Innovations in Computer Science and Engineering*. 2016. P. 295-303.
7. Belenko M.V., Balakshin P.V. Comparative analysis of speech recognition systems with open code. *International Research Journal*. 2017. №4(58). P. 13-18.
8. Liu M., Yang J. An Improvement of TFIDF Weighting in Text Categorization. *International Proceedings of Computer Science Information Technology*. 2012. Vol. 47. P. 44-47.
9. Kravchenko Yu.A., Mansur A.M., Mohammad J. Text vectorization using data mining methods. *IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES*. 2021. №2 (219). P. 154-167.
10. Esbensen Kim H. Multivariate Data Analysis – In Practice. *CAMO Process AS, Oslo, Norway*. 2002. 160 p.

Alexander A. Dmitriev

Candidate of Science in Physics and Mathematics,
Associate Professor at the Department of Information Security,
Altai State University,
61, Lenina avenue, Barnaul, Russia, 656049,
Phone: +7 (3852) 298-199,
E-mail: dmitriev@asu.ru

Denis A. Dmitriev

Postgraduate at the Department of
of Information Security, Altai State University,
61, Lenina avenue, Barnaul, Russia, 656049,
Phone: +7 (3852) 291-297,
E-mail: dmitriev_d_a@vc.asu.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПАМЯТИ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотрены этапы и особенности реализации программной системы, предназначенной для автоматизации цикла вычислительных экспериментов с наименьшими временными затратами за счет параллельного выполнения SIMD-задач моделирования серии газотермических покрытий с различными наборами варьируемых параметров напыляемых материалов. В плане функциональности в ПС реализованы определенные требования, качественно улучшающие эффективность вычислений и обработки результатов моделирования. Выявлены некоторые недостатки в архитектурном плане основного вычислительного модуля моделирования покрытий, а также предложен перечень способов модернизации программного пакета. Некоторые способы уже реализованы, остальные способы находятся в состоянии реализации и доработки.

Ключевые слова: *программная система, автоматизация цикла вычислительных экспериментов, параллельное выполнение SIMD-задач, моделирование, напыление, газотермические покрытия.*

Введение

В настоящее время в области материаловедения, в частности, в области нанесения защитных коррозионностойких и жаропрочных покрытий на технические изделия, а также при создании конструкционных функциональных материалов, остаются нерешенными многие проблемы и вопросы, связанные с оптимизацией технологий газотермического напыления (ГТН) и холодного газодинамического напыления (ХГН) покрытий. Качество покрытий во многом зависит не только от физических свойств порошкового материала напыляемых частиц и поверхности изделий, на которую напыляется покрытие, но и от температурно-скоростных параметров и плотности потока напыляемых частиц, а также от свойств транспортирующего газа и других параметров. Количество параметров и характеристик, связанных с задачей оптимизации технологий напыления покрытий достаточно велико, используемые материалы при напылении покрытий являются дорогостоящими и эксперименты на поисковые исследования занимают длительное время. Поэтому применение методов компьютерного моделирования процессов формирования слоистой структуры напыляемых покрытий и расчета их функциональных характеристик является актуальным и позволяет целенаправленно проводить такие поисковые исследования. Использование вычислительных платформ в виде многопроцессорных кластерных параллельных систем позволяет достигать высоких показателей ускорения вычислений при использовании стандартов и технологий параллельного (распределенного) программирования. В распоряжении авторов имеется ранее разработанный программный комплекс, предназначенный для моделирования напыляемых ГТН-покрытий и расчета их функциональных характеристик, который встроено в качестве основного вычислительного модуля в **программную систему (ПС) с архитектурой параллельного выполнения однотипных SIMD-задач для моделирования определенного класса газотермических покрытий** [1]. Каждой SIMD-задаче (англ., single instruction, multiple data - с одинаковым программным кодом, но с различными наборами данных) на вход формируется свой индивидуальный набор входных параметров режима напыления, который и определяет в результате выполнения этой SIMD-задачи одно определенное покрытие из целого класса покрытий. Таким образом, программная система при выполнении параллельных вычислений реализует режим «параллелизма задач» и в таком режиме с высоким коэффициентом ускорения вычислений можно практически одновременно смоделировать достаточно большое количество ГТН-покрытий в зависимости от масштаба используемой распределенной кластерной вычислительной системы. Архитектура ПС, обеспечивающей параллельное выполнение однотипных SIMD-задач [1], показана на рисунке 1. Для автоматизации цикла (серии) вычислительных экспериментов (ВЭ) по моделированию класса ГТН-покрытий в ПС реализована возможность обработки результатов и оформления электронных отчетов (оформления графиков, таблиц и т.п.).

В плане функциональности в ПС реализованы следующие требования [1]:

- хранение данных с поддержкой различных форматов представления;
- возможность встраивания собственных форматов представления;

- обработка данных часто используемыми функциями;
- возможность создания собственных функций обработки;
- возможность разработки, встраивания и исполнения различных сценариев обработки;
- удобный пользовательский интерфейс с поддержкой отладки сценариев;
- отображение результатов обработки в удобной форме;
- устойчивость системы к сбоям в функциях обработки;
- возможность распараллеливания вычислений.

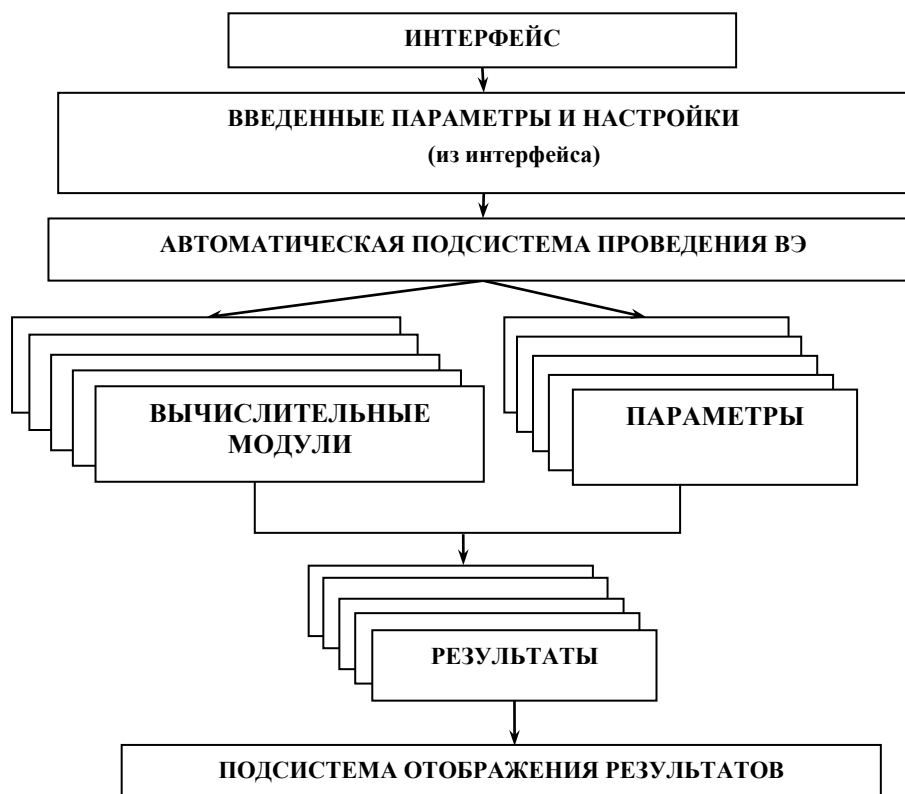


Рис. Структура и состав программной системы

Кроме того, в ПС реализован основной принцип создания нескольких функциональных компонентов (отдельных независимых программ) [1], связанных между собой возможностью работы с общим хранилищем данных (файлом, базой данных и т.д., см. рис. 1).

1. Назначение *Интерфейса* заключается во вводе исходных данных и параметров для проведения отдельного ВЭ. Результатом работы является блок данных определенной структуры, сохраняемый в хранилище данных, как правило, в виде специально оформленного файла или записи в определенной «базе данных» (БД).

2. *Вычислительный модуль (ВМ)* и его копии при запуске обращаются в хранилище, находят в нем соответствующий блок входных данных для «очередного» ВЭ и производят основные вычисления эксперимента с сохранением результатов работы ВМ в хранилище в виде другого блока данных.

3. *Модуль обработки результатов вычислений* получает результаты, полученные от основного ВМ, и обрабатывает их с целью получения «наглядных» данных для экспериментатора – готовит сформированные файлы отчетов (электронные отчеты: файлы с графиками, либо с таблицами, изображениями, а иногда и полные отчеты «высокой готовности», с которыми и работает пользователь).

4. *Скрипты для автоматического проведения ВЭ* занимаются процессами диспетчеризации, последовательно и многократно запуская копии ВМ с различными наборами входных данных одинаковой структуры и размеров (запуск SIMD-задач) на различных вычислительных узлах, дожидаясь окончания выполнения SIMD-задач.

Модернизация разрабатываемого ПО для моделирования покрытий [1-4] преследует цель дальнейшей автоматизации проведения экспериментов, позволяющего вычислять функциональ-

ные и эксплуатационные характеристики порошковых покрытий, получаемых различными газотермическими технологиями напыления порошковых материалов на технические изделия (в т.ч. плазменным, детонационно-газовым, высокоскоростным газопламенным и другими способами). На характеристики покрытия оказывают влияние различные «ключевые физические параметры (КФП)» напыляемых частиц (скорость, температура, диаметр частиц и др.) и параметры материала основы (подложки) [1, 2, 4-6]. Детальные исследования такого влияния требуют проводить массовые серии ВЭ, а ПО должно обладать высокоэффективными характеристиками вычислений.

Модернизация архитектуры ВМ и оптимизация использования ресурсов памяти в программном пакете (программной системе)

На текущий момент основной ВМ программной системы (и копии ВМ в ПС), который выполняет основной объем вычислений по моделированию каждого отдельного покрытия, имеет ряд недостатков.

1. Организационная структура ВМ, моделирующего слоистую структуру покрытия, в своем составе содержит, условно говоря, подсистемы «СПЛЭТ» и «ПОКРЫТИЕ», жестко связанные порядком работы и не допускают варианта отдельного использования. Практика показала, что это не способствует принципу автоматизации работы всей программной системы (программного пакета).
2. Возникла потребность в реализации новой подсистемы – планировщика заданий. Данная подсистема нужна для проведения комплексных исследований влияния различных режимов напыления (различных наборов параметров) на свойства покрытий. Данная подсистема должна будет формировать очередь заданий для выполнения серии экспериментов моделирования, запускать некоторое число независимых подсистем формирования покрытия, отслеживать окончание их работы и запускать следующие задания из очереди.
3. Практика показала, что результаты вычислительных экспериментов занимают очень много места на жестком диске, но хорошо сжимаются архиваторами. Имеет смысл разработать подсистему, которая бы объединяла все результаты вычислительных экспериментов в единый архив (единое хранилище данных) для продолжительного хранения.
4. Подсистему визуализации в виде 2D- и 3D-изображений покрытий и их сечений (компьютерных шлифов) следует выделить в отдельное приложение, предназначенное для просмотра результатов по мере необходимости, а не только в момент проведения вычислительного эксперимента.
5. Подсистему визуализации поверхности покрытия и ее сечений (шлифов) следует дополнить возможностью выделения контуров сплэтов (окантовки) разными цветами – для более эффективного анализа структуры покрытий (в т.ч. и структуры пористости покрытия).
6. Справочную подсистему «База данных», хранящую различные физические свойства материалов (используемых при напылении), следует дополнить функцией автоматического добавления данных о свойствах различных химических соединений, полученных в результате моделирования. В существующей версии ВМ эта возможность пока отсутствует. Поэтому пока приходится в «Базу данных» добавлять новые данные вручную.
7. Переход на платформу x64. Комплекс закладывался во времена, когда большинство операционных систем были x32, а также стоимость оперативной памяти была высокой. Большие объемы памяти не поддерживались системами и были дорогими в цене. Сейчас ситуация изменилась: поддержка ОС x32 сворачивается, все компьютеры изначально идут на ОС x64. Стоимость оперативной памяти значительно уменьшилась, сейчас объемы ОП в 16 Гб являются обычными. Поэтому крайне важно перейти на новую платформу (без совместимости с x32), чтобы обеспечить доступ к большому объему оперативной памяти. Это позволит быстрее обрабатывать покрытие и как можно меньше использовать жесткий диск для подкачки памяти. На сегодняшний момент, необходимость использования жесткого диска – это одна из самых затратных по времени операций, на нее расходуется приблизительно 1/3 всего времени работы. Если удастся его сократить, то это будет качественный прорыв в быстродействии.
8. Следует доработать подсистему моделирования покрытия с учетом реализации сложных движений сопла напыления. Это позволит подбирать алгоритмы движения сопла для полу-

- чения более равномерного покрытия и исследовать влияния движения на пористость и шероховатость.
9. Следует доработать функцию построения картинок в векторном формате. Сейчас шлифы строятся в векторном формате svg. Необходимо доработать его (улучшить отображение осей, увеличить подписи), а также реализовать возможность построения горизонтальных шлифов в формате svg.
 10. Для реализации моделирования многослойных покрытий необходимо реализовать функцию загрузки результата моделирования предыдущего слоя для продолжения моделирования всего многослойного покрытия. Сейчас все слои моделируются последовательно, в процессе единого эксперимента. Необходимо доработать подсистемы так, чтобы можно было промоделировать один слой, сохранить, а потом несколько раз отдельно загружать его и накладывать дополнительные слои с разными характеристиками. Это позволит сэкономить время на моделировании первого слоя в случае, если он остается одинаковым.
 11. Необходимо проработать возможность использования СУБД для организации хранения данных во время работы. Сейчас используется специальный алгоритм кэширования данных на жесткий диск для экономии памяти. Необходимо проверить целесообразность перехода на кэш в виде современной СУБД. Использование СУБД может дать дополнительное преимущество при распараллеливании работы между программами, находящимися на различных ПК в сети.
 12. Необходимо в подсистеме «Покрытие» отдельные этапы укладки сплэта оформить отдельными функциями. Это позволит в будущем сделать ряд сложных ветвлений кода при разных способах напыления, например, при реализации возможности моделирования метода «холодного газодинамического напыления» (ХГН). Сейчас порядок этапов работы строго определен: вычисление координат/размеров, укладка ядра, укладка периферии, добавление толщины и т.п. Необходимо более гибкая парадигма, чтобы можно было дополнять другие функции (функция отскока частицы, активации подложки и т.д.)

В первую очередь, в составе ВМ уже осуществлено разделение на независимые компоненты – на процедуру визуализации данных и вычислительные процедуры (формирование сплэтов и самого покрытия). Такой подход позволил резко повысить вычислительную эффективность, т.е. независимые вычислительные модули комплекса можно будет запускать на высокопроизводительных узлах (ПК) в конфигурации распределенных (параллельных) вычислений с сохранением основных результатов слоистой структуры покрытий на жестком диске (или на нескольких дисках), что позволит круглосуточно в течении нескольких дней (недель) не прерывать работу многопроцессорной конфигурации и выполнять большие серии вычислительных экспериментов для моделирования целого класса покрытий для различных режимов их формирования (напыления). Оператору нет смысла каждый раз ожидать окончания вычислений одного вычислительного эксперимента, чтобы запустить следующий расчет. Поэтому интерфейсная компонента не должна быть встроенной в вычислительные модули. Процедуры построения графиков и анализа результатов также отделены и запускаются по необходимости в режимах, позволяющих сэкономить время на анализе. Подсистема визуализации отделена и располагается на рабочем ПК оператора (исследователя), а вычислительные ресурсы этого ПК не используются для основных вычислений, а используются на отображение результатов, что также требует определенных ресурсов.

Во-вторых, минимизировано количество различных массивов, предназначенных для временного хранения в оперативной памяти (ОП) промежуточных результатов процесса моделирования сплэтов и всего покрытия, что позволило более рационально использовать ресурсы ОП и увеличить размеры моделируемых покрытий.

Устранение остальных недостатков и необходимых элементов модернизации ПО находится в текущий момент в непосредственной разработке и доработке. Для отладки и тестирования модифицируемого ПО в распоряжении авторов имеется вычислительный кластер на 2-х узлах. Характеристики каждого узла: 2 процессора Intel Xeon E5-2690v3, 64 Гб ОЗУ. Всего: 48 ядер, 98 потоков, связь между узлами через InfiniBand Mellanox 40G/56G.

Кроме того, имеются 3 дополнительные вычислительные системы.

Система 1: Intel i7-4710MQ (2.5 ГГц): 4 ядра, 8 потоков, 8 Гб ОЗУ, Win7x64, SSD: Kingston SV300S37A240G (240 Гб, скорость обмена 450 Мб/сек);

Система 2: Intel i5-4690 (3.5 ГГц): 4 ядра, 4 потока, 12 Гб ОЗУ, Win7x64, HDD: ST3500630AS (500 Гб, скорость обмена 7200 об/мин);

Система 3: Intel i5-4690 (3.5 ГГц): 4 ядра, 4 потока, 12 ГБ ОЗУ, Win7x64, SSD: Corsair Force GS (256 ГБ, скорость 500 МБ/сек).

Заключение

Реализованная программная система, несмотря на свою простоту, дает ряд существенных преимуществ:

- нет необходимости распараллеливать каждую копию ВМ;
- производится систематизация получаемых результатов ВЭ, возможность оперативного создания общего электронного отчета с иллюстративным материалом исследований;
- экономия времени за счет автоматизации оформления общего электронного отчета (взамен работы исследователя по составлению отчета «вручную»);
- цикл ВЭ производится «конвейерным» способом и нет потерь времени между выполнением отдельных ВЭ;
- практически исключены ошибки за счет так называемого «человеческого фактора»;
- создается компактный архив, позволяющий получить исчерпывающие данные о каждом ВЭ спустя длительное время, что целиком оправдывает временные затраты на разработку соответствующих программных модулей.

Данная методика апробирована и рекомендуется к встраиванию в вычислительные программы, выполняющие серии однотипных расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Solonenko O.P., Blednov V.A., Iordan V.I. Computer design of thermal sprayed metal powder coatings // Thermophysics and Aeromechanics. 2011. Vol. 18, No. 2. P. 255-272.
2. Solonenko O.P., Jordan V.I., Blednov V.A. Stochastic Computer Simulation of Cermet Coatings Formation // Advances in Materials Science and Engineering. 2015, Vol. 2015. Article ID 396427. 16 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/396427>
3. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Программная система для параллельного выполнения однотипных SIMD-задач по моделированию газотермических покрытий с варьируемыми параметрами напыляемых материалов // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2018. № 1(8). С. 64-68.
4. Иордан В.И., Бледнов В.А., Солоненко О.П. Компьютерное моделирование покрытий TiC-30vol.%NiCr с варьируемыми параметрами напыляемых материалов с помощью программной системы параллельного выполнения SIMD-задач // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2018. № 1(8). С. 69-73.
5. Иордан В.И., Бледнов В.А. Оптимизация режимов стабильного формирования термобарьерных градиентных металлокерамических покрытий TiNi-(55, 60, 65, 70)об.%TiC: компьютерное моделирование на платформе SIMD-архитектуры параллелизма вычислений // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2024. Т. 8, № 2. С. 66-76.
6. Jordan V.I., Blednov V.A. Study of the Functional Characteristics of TiNi Coatings by the Computer-Aided Simulation Using Parallel Computing // Communications in Computer and Information Science. 2024. Vol. 1986. P. 75-91.

Решетов Виталий Евгеньевич
Аспирант и ассистент каф.
Вычислительной техники и
электроники, Алтайский
государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина
пр-т, д. 61,
Тел.: +7-385-229-66-44
Эл. почта: reshetovbl1tz1@mail.ru

Иордан Владимир Иванович
Канд. физ.-мат. наук, доцент каф.
Вычислительной техники и
электроники, Алтайский
государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина
пр-т, д. 61,
ORCID 0000-0002-6309-7271
Тел.: +7-960-937-89-00
Эл. почта: W_Jordan@mail.ru

Бледнов Виталий Александрович
Канд. техн. наук, инженер лаб. № 6,
Институт теоретической и приклад-
ной механики им. С.А. Христиано-
вича СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск,
Институтская ул., д. 4/1,
Тел.: +7-905-081-86-80, Эл. почта:
nightmail@rambler.ru

V.E. RESHETOV, V.I. JORDAN, V.A. BLEDNOV

ARCHITECTURE UPGRADE AND OPTIMIZATION OF MEMORY RESOURCES USAGE IN A SOFTWARE PACKAGE FOR SIMULATION OF GAS-THERMAL COATINGS AND THEIR FUNCTIONAL CHARACTERISTICS

The stages and features of the program system implementation designed to automate the cycle of computational experiments with the smallest time costs by parallel execution of SIMD tasks to simulation of a series of gas-thermal

coatings with different sets of variable parameters of the sprayed materials are considered. In terms of functionality, certain requirements have been implemented in the software, qualitatively improving the efficiency of calculations and processing of modeling results. Some shortcomings in the architectural plan of the main computing module for modeling coatings have been identified, and a list of methods for upgrading the software package has been proposed. Some methods have already been implemented, while other methods are in the process of implementation and refinement.

Keywords: program system, automation of cycle of computational experiments, parallel execution of SIMD tasks, simulation, spraying, gas-thermal coatings.

REFERENCES

1. Solonenko O.P., Blednov V.A., Jordan V.I. Computer design of thermal sprayed metal powder coatings. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2011. Vol. 18. No. 2. P. 255-272.
2. Solonenko O.P., Jordan V.I., Blednov V.A. Stochastic Computer Simulation of Cermet Coatings Formation. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. Article ID 396427. 16 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/396427>
3. Blednov V.A., Jordan V.I., Solonenko O.P. Program System for Parallel Execution of SIMD Tasks to Simulation of Gas-Thermal Coatings with Variable Parameters of Sprayed Materials. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2018. No. 1(8). P. 64-68.
4. Jordan V.I., Blednov V.A., Solonenko O.P. Computer Simulation of Coatings TiC-30vol.%NiCr with Variable Parameters of Sprayed Materials by Means of Program System for Parallel Execution of SIMD-Tasks. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2018. No. 1(8). P. 69-73.
5. Jordan V.I., Blednov V.A. Optimization of Stable Formation Modes of Thermobarrier Gradient Metal-Ceramic Coatings TiNi-(55, 60, 65, 70)vol.%TiC: Computer Simulation on the Platform of SIMD-Architecture of Calculation Parallelism. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2024. Vol. 8. No. 2. P. 66-76.
6. Jordan V.I., Blednov V.A. Study of the Functional Characteristics of TiNi Coatings by the Computer-Aided Simulation Using Parallel Computing. *Communications in Computer and Information Science*. 2024. Vol. 1986. P. 75-91.

Vitaly E. Reshetov

Postgraduate student and assistant at the Department of Computing Techniques and Electronics, Altai State University
61, Lenina ave., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7-385-229-66-44
E-mail: reshetovbl1tz1@mail.ru

Vladimir I. Jordan

PhD of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Computing Techniques and Electronics Altai State University
61, Lenina ave., Barnaul, Russia, 656049
ORCID 0000-0002-6309-7271
Phone: +7-960-937-89-00
E-mail: W_Jordan@mail.ru

Vitaliy A. Blednov

PhD of Engineering Science, Khristianovich institute of theoretical and applied mechanics, SB RAS,
4/1, Institutskaya str., Novosibirsk, Russia, 630090,
Phone: +7-905-081-86-80
E-mail: nightmail@rambler.ru

УДК 004.94

В.В. ЖУРАВЛЕВА, А.С. МАНИЧЕВА, Д.В. КОРНЕЙ, А.И. МЕТАЛЬНИКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПАЦИЕНТОВ С ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

Современные информационные технологии применяются в разнообразных областях, и их внедрение в медицину становится одной из перспективных направлений последнего десятилетия. Использование методов машинного обучения в различных сферах медицины позволит вывести её на новый, более эффективный уровень.

Анализ различных методов машинного обучения и подходов к повышению качества классификации патологических состояний может быть использован в перспективе для решения проблем, связанных с диспластическими проявлениями у пациентов. Обучение и тестирование методов машинного обучения выполнено на реальных данных, собранных на клинических базах Алтайского государственного медицинского университета.

Результаты исследования, полученные в данной работе, имеют практическую значимость, связанную с автоматизацией процесса диагностики патологических состояний при дисплазии соединительной ткани, и использованы в амбулаторной практике для помощи молодым врачам в принятии решений. Теоретическая значимость состоит в подтверждении эффективности и перспективности использования методов компьютерной диагностики с использованием машинного обучения в конкретной проблематике, а также для решения аналогичных задач в других областях медицины.

Ключевые слова: *Дисплазия соединительной ткани, обработка данных, методы машинного обучения, классификация патологий.*

Введение

Под термином «дисплазия» принято понимать обширный ряд патологий, связанных с врожденным нарушением строения и функции соединительной ткани. Основную массу диспластических процессов составляют хронические заболевания [1]. Они оказывают влияние на качество жизни человека, так как соединительная ткань, не отвечая за работоспособность конкретных органов или систем органов, обеспечивает выполнение следующих функций: противостоит внешним воздействиям, поддерживает формы и структуры органов и тканей, обеспечивает питание и обмен веществ в организме [2].

Проблему классификации патологий, связанных с диспластическими проявлениями, долгое время не рассматривали детально, в связи с отсутствием единых методов диагностических подходов [3]. Отсутствие единой и всеобщей классификации свидетельствует о различных взглядах исследователей на данную проблему в целом.

Несмотря на существование различных методик, диагностика ряда форм диспластических проявлений, особенно, на начальных этапах, всё ещё представляет сложности. Многие симптомы и проявления могут быть схожи с другими заболеваниями, что затрудняет точную клиническую картину [4-10].

В детской хирургической и педиатрической практике становится всё более очевидным, что дальнейшее повышение эффективности диагностики, лечения и диспансеризации пациентов с дисплазией соединительной ткани невозможно без использования современных технологических подходов, основанных на машинном обучении.

Практическая часть исследования

Набор данных, использованных в исследовании, содержит необходимую информацию о результатах мониторинга пациентов с диспластическими проявлениями соединительной ткани. Данные получены на клинических базах Алтайского государственного медицинского университета авторами статьи. В исследовании приняли участие 254 пациента с диспластическими процессами соединительной ткани. Из них 132 пациента составили основную группу, для которых использовалась компьютерная диагностика, 122 пациента составили группу сравнения, для них были рекомендованы стандартные диагностические мероприятия. Средний возраст составил 5.7 ± 0.8 лет. Исследование проводили с 2014 по 2024 годы.

Большая часть датасета – это показатели проведенных обследований:

1. Биохимический анализ крови: кальций сыворотки крови, фосфор сыворотки крови, оксипролин сыворотки крови.
2. Биохимический анализ мочи: экскреция кальция, экскреция фосфора и экскреция оксипролина.
3. Компьютерная стабилметрия.
4. Электронейромиографическое обследование.
5. Рентгенологическое обследование позвоночника – изменение контуров замыкательных пластинок, остеопороз тел позвонков, клиновидная форма тел позвонков, остеохондроз, грыжи Шморля, уменьшение высоты межпозвоночного диска и изменение контуров апофизов.

К набору данных применяли разнообразные методы предварительной обработки данных, включающие в себя разметку, очистку от ошибок и выбросов, заполнение пропущенных значений, нормализацию и стандартизацию. Это позволяет повысить качество и достоверность данных, выявить некоторые закономерности в их структуре, а также, подготовить их для дальнейшего анализа.

В качестве целевых переменных выступают следующие виды патологических проявлений, связанные с дисплазией соединительной ткани, диагностируемых при помощи дополнительных методов обследования:

1. Электронейромиографическое обследование – изменение мышечного тонуса;
2. Рентгенологическое обследование – изменение контуров замыкательных пластинок; остеопороз тел позвонков; клиновидная форма тел позвонков; ранний юношеский остеохондроз; грыжи Шморля; уменьшение высоты межпозвоночного диска; изменение контуров апофизов.

Среди методов машинного обучения, применяемых в анализе медицинских данных, были выбраны и протестированы: логистическая регрессия (LR), линейный дискриминантный анализ (LDA), дерево решений (DT), «случайный лес» (RF) и метод К-ближайших соседей (KNN). Эти методы хорошо зарекомендовали себя в анализе медицинских данных и распространены в научных исследованиях.

Для реализации указанных выше методов использовалась стандартная библиотека языка программирования Python – Scikit-Learn [11], содержащая методы для визуализации, классификации, кластеризации и других технологий интеллектуального анализа данных.

Гиперпараметры методов подбирались с использованием модуля GridSearchCV, который автоматически определяет оптимальные параметры моделей путём упорядоченного перебора.

В результате были подобраны следующие гиперпараметры для указанных методов:

- *дерево решений* (class_weight = 'balanced', criterion = 'gini', max_features = 'sqrt', max_depth = 20, min_samples_leaf = 8, min_samples_split = 16);
- *случайный лес* (class_weight = 'balanced', criterion = 'gini', max_features = 'sqrt', max_depth = 20, min_samples_leaf = 8, min_samples_split = 16, bootstrap = False, n_estimators = 50);
- *логистическая регрессия* (class_weight = 'balanced', C = 1000, penalty = 'l1', solver = 'liblinear', multi_class = 'ovr');
- *линейный дискриминантный анализ* (solver = 'svd', store_covariance = True, tol = 1.0e-8);
- *метод К ближайших соседей* (n_neighbors = 2, p = 1, weights = 'uniform', algorithm = 'auto').

Для оценки эффективности моделей классификации были использованы следующие функции из библиотеки sklearn.metrics: коэффициент корреляции Мэтьюса, метрика Accuracy.

В таблице 1 указано качество методов по 5-блоковой перекрестной проверке (mcc) после нахождения оптимальных гиперпараметров. Перекрестная проверка показывает адекватность метода в целом применительно к имеющимся данным.

Таблица 1.

Коэффициент корреляции Мэтьюса

	LR	LDA	DT	RF	KNN
mcc	0.927	0.796	0.869	0.905	0.849

Рассмотренные методы машинного обучения показали разные результаты на имеющихся данных. В частности, логистическая регрессия и случайный лес дали лучшее по сравнению с остальными методами качество по перекрестной проверке и являлись более устойчивыми относительно гиперпараметров. Все это является показателем их адекватности применительно к данным.

Далее была оценена адекватность моделей машинного обучения и устойчивость относительно гиперпараметров с использованием показателя ассигасы. Проверялись уже обученные модели на тестовом наборе данных, который не принимал участие в поиске гиперпараметров и параметров моделей. Эта проверка позволяет оценить предсказательную способность модели и определить, насколько хорошо она может работать на практике. Результаты оценки адекватности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Качество обученных моделей

Виды патологий	LR	LDA	DT	RF	KNN
Изменение контуров замыкательных пластинок	0,757	0,766	0,724	0,792	0,712
Клиновидная форма тел позвонков	0,775	0,775	0,781	0,781	0,771
Грыжи Шморля	0,979	0,985	0,976	0,979	0,958
Остеопороз тел позвонков	0,695	0,668	0,681	0,706	0,653
Уменьшение высоты межпозвоночного диска	0,973	0,976	0,976	0,976	0,973
Изменение контуров апофизов	0,955	0,961	0,961	0,958	0,925
Остеохондроз	0,961	0,973	0,967	0,967	0,952
Электронеуромиографические изменения мышц спины	0,911	0,911	0,866	0,891	0,837

При анализе показателей таблицы 2 получены выводы:

1) Достоверно визуализируются грыжи Шморля, уменьшение высоты межпозвоночного диска, изменение контуров апофизов и остеохондроз.

2) Сомнительно визуализируется рентгенологически остеопороз тел позвонков.

Рассмотренные методы машинного обучения показали значимые достоверные результаты на имеющихся данных. Для интеграции в веб-приложение был выбран случайный лес. Это связано с отсутствием жестких требований по предобработке данных, лучшей обобщающей способностью и стабильностью по сравнению с другими методами.

Менее значимо и достоверно, в решении данной задачи, показал себя метод К-ближайших соседей. Это связано с «проклятием размерности», которое заключается в том, что все объекты становятся примерно одинаковыми в сравнении друг с другом, что затрудняет классификацию. Для применения данного метода требуется предобработка данных (стандартизация, нормализация и т.д.).

Заключение

Анализ различных методов машинного обучения и подходов к повышению их качества может быть использован в будущих исследованиях.

Благодаря полученным данным врачи смогут принимать индивидуальные решения о дальнейшем лечении каждого пациента.

На основе построенной модели предсказания патологических состояний планируется создание веб-приложения, которое должно помочь в автоматизации процесса диагностики пациентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гнусаев С.Ф., Кадурина Т.И., Николаева Е.А. Педиатрические аспекты дисплазии соединительной ткани. Перспективы и достижения. Москва – Тверь – Санкт-Петербург. 2013 [Электронный ресурс]. URL:http://repo.tvergma.ru/192/1/sbornik_ped_displaz_soed_tissues.pdf. Дата обращения 05.03.2024.

2. Метальников А.И., Осипов А.А. и др. Дисплазия соединительной ткани у детей в аспекте опыта врача-ортопеда амбулаторно-поликлинического звена // Детская хирургия. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.18821/1560-9510-2019-23-5-281-284>. Дата обращения 19.02.2024.
3. Cherkasov N.S., Lutsenko Y.A. Modern problems of nissue dysplasia in children pathogenesis of connective // Journal of Volgograd State Medical University. 2020. №76(4): 16-23 DOI:10.19163/1994-9480-2020-4(76)-16-23.
4. Flatt A., Allen J., Bragg A., et al. Heart rate variability in college football players throughout preseason camp in the heat // International Journal of Sports Medicine. 2020. №41(9), 589-595. DOI: 10.1055/a-1145-3754.
5. Guzii O., Romanchuk A., Mahlovanyy A. Post-loading dynamics of heart rate variability indices in highly qualified athletes in the formation of overstrains by sympathetic and parasympathetic types // Art Med. 2020. №4(16). P. 28-36. doi: 10.21802/artm.2020.4.16.28
6. Kamandulis S., Juodsnukis A., et al. Daily resting heart rate variability in adolescent swimmers during 11 weeks of training // Int J Environ Res Public Health. 2020. №17(6), 2097. DOI: 10.3390/ijerph17062097
7. Kolokoltsev M., Ambartsumyan R., et al. Perception of academic load in physical education according to the Borg scale by female students with somatic diseases // Journal of Physical Education and Sport. 2021. Vol. 21 (5). Art. 353. P. 2650–2656. DOI:10.7752/jpes.2021.05353
8. Lefaucheur J. P. Assessment of autonomic nervous system dysfunction associated with peripheral neuropathies in the context of clinical neurophysiology practice // Neurophysiologie clinique = Clinical neurophysiology. 2023. №53(2), 102858. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2023.102858>
9. Lichti J., Maggioni M. A. et al. The relevance of body composition assessment for the rating of perceived exertion in trained and untrained women and men // Frontiers in physiology. 2023. №14, 1188802. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1188802>
10. Losnegard T., Skarli S. et al. Is Rating of Perceived Exertion a Valuable Tool for Monitoring Exercise Intensity During Steady-State Conditions in Elite Endurance Athletes? // International journal of sports physiology and performance. 2021. №16(11). P. 1589–1595. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0866>
11. Scikit-learn. Machine Learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> Дата обращения: 27.02.2025.

Журавлева Вера Владимировна

Доцент каф. теоретической кибернетики
и прикладной математики,
ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
ORCID 0000-0002-8789-7476
Тел.: +7-913-273-07-35
Эл. почта: vvzhuravleva@mc.asu.ru

Маничева Анастасия Станиславовна

Доцент каф. теоретической кибернетики
и прикладной математики,
ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
ORCID 0000-0002-3820-0062
Тел.: +7-913-086-38-73
Эл. почта: manichevaas@mc.asu.ru

Корней Дмитрий Владимирович

Инженер каф. теоретической кибернетики
и прикладной математики,
ФГБОУ ВО "Алтайский государственный университет",
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61,
Тел.: +7-903-919-29-52
Эл. почта: korney1404@gmail.com

Метальников Антон Иванович

Заведующий каф. хирургических болезней
детского возраста,
ФГБОУ ВО "Алтайский государственный
медицинский университет",
656019, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 40,
ORCID 0000-0001-5383-0225
Тел.: +7-923-164-76-03
Эл. почта: ametalnikov@yandex.ru

V.V. ZHURAVLEVA, A.S. MANICHEVA, D.V. KORNEY, A.I. METALNIKOV

APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN COMPUTER DIAGNOSTICS OF PATIENTS WITH CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA

Modern information technologies are used in various fields, and their implementation in medicine is becoming one of the promising areas of the last decade. The use of machine learning methods in various areas of medicine will allow it to reach a new, more effective level.

Analysis of various machine learning methods and approaches to improving the quality of classification of pathological conditions can be used in the future to solve problems associated with dysplastic manifestations in patients. Training and testing of machine learning methods was performed on real data collected from clinical sites of the Altai State Medical University.

The results of the study obtained in this work have practical significance associated with the automation of the process of diagnosing pathological conditions in connective tissue dysplasia, and are used in outpatient practice to help young doctors in decision-making. The theoretical significance consists in confirming the effectiveness and prospects of using computer diagnostic methods using machine learning in a specific problematic area, as well as for solving similar problems in other areas of medicine.

Keywords: *Connective tissue dysplasia, data processing, machine learning methods, classification of pathologies.*

REFERENCES

1. Gnusaev S.F., Kadurina T.I., Nikolaeva E.A. Pediatric aspects of connective tissue dysplasia. Prospects and achievements. Moscow – Tver – Saint Petersburg, 2013 [Electronic resource]. URL: http://repo.tvergma.ru/192/1/sbornik_ped_displaz_soed_tissues.pdf Date of request 03/05/2024. (in Russian)
2. Metalnikov A.I., Osipov A.A. and others. Connective tissue dysplasia in children in the context of the experience of an outpatient orthopedic doctor. *Pediatric surgery*. 2019. [electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.18821/1560-9510-2019-23-5-281-284>. Date of request: 02/19/2024. (in Russian)
3. Cherkasov N.S., Lutsenko Y.A. Modern problems of nissue dysplasia in children pathogenesis of connective. *Journal of Volgograd State Medical University*. 2020, №76(4): 16-23 DOI:10.19163/1994-9480-2020-4(76)-16-23
4. Flatt A., Allen J., Bragg A., et al. Heart rate variability in college football players throughout preseason camp in the heat. *International Journal of Sports Medicine*. 2020. №41(9), 589-595. DOI: 10.1055/a-1145-3754
5. Guzii O., Romanchuk A., Mahlovanyy A. Post-loading dynamics of heart rate variability indices in highly qualified athletes in the formation of overstrains by sympathetic and parasympathetic types. *Art Med*. 2020. №4(16), 28-36. doi: 10.21802/artm.2020.4.16.28
6. Kamandulis S., Juodsnukis A., et al. Daily resting heart rate variability in adolescent swimmers during 11 weeks of training. *Int J Environ Res Public Health*. 2020. №17(6), 2097. DOI: 10.3390/ijerph17062097
7. Kolokoltsev M., Ambartsumyan R., et al. Perception of academic load in physical education according to the Borg scale by female students with somatic diseases. *Journal of Physical Education and Sport*. 2021. Vol. 21 (5), Art. 353, pp. 2650–2656. DOI:10.7752/jpes.2021.05353
8. Lefaucheur J. P. Assessment of autonomic nervous system dysfunction associated with peripheral neuropathies in the context of clinical neurophysiology practice. *Neurophysiologie clinique = Clinical neurophysiology*. 2023. №53(2), 102858. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2023.102858>
9. Lichti J., Maggioni M. A. et al. The relevance of body composition assessment for the rating of perceived exertion in trained and untrained women and men. *Frontiers in physiology*. 2023. №14, 1188802. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1188802>
10. Losnegard T., Skarli S. et al. Is Rating of Perceived Exertion a Valuable Tool for Monitoring Exercise Intensity During Steady-State Conditions in Elite Endurance Athletes? *International journal of sports physiology and performance*. 2021. №16(11), 1589–1595. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2020-0866>
11. Scikit-learn. Machine Learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> Дата обращения: 27.02.2025.

Vera V. Zhuravleva

Associate professor of Department of Theoretical Cybernetics and Applied Mathematics,
Altai State University
61, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656049
ORCID 0000-0002-8789-7476
Phone: +7-913-273-07-35
E-mail: vvzhuravleva@mc.asu.ru

Anastasia S. Manicheva

Associate professor of Department of Theoretical Cybernetics and Applied Mathematics,
Altai State University
61, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656049
ORCID 0000-0002-3820-0062
Phone: +7-913-086-38-73
E-mail: manichevaas@mc.asu.ru

Dmitry V. Korney

Engineer of Department of Theoretical Cybernetics and Applied Mathematics
Altai State University,
61, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656049,
Phone: +7-903-919-29-52
E-mail: korney1404@gmail.com

Anton I. Metalnikov

Head of the Department of Surgical Diseases of Childhood,
Altai State Medical University,
40, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656019,
ORCID 0000-0001-5383-0225
Phone: +7-923-164-76-03
E-mail: ametalnikov@yandex.ru

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В статье предложен способ безразборной диагностики технического состояния подвески автомобиля на основе оценки параметров её математической модели. Рассмотрена эквивалентная линейная модель подвески типа Макферсон, представленная в виде передаточной функции. Для определения коэффициентов передаточной функции использован вещественный интерполяционный метод, позволяющий оценить эквивалентную жёсткость пружины, коэффициент демпфирования и статический коэффициент передачи. Проведена апробация метода на данных компьютерной симуляции в среде Project Chrono, имитирующей различные состояния подвески. Результаты показали, что отклонения параметров модели от эталонных значений коррелируют с износом пружин и амортизаторов. Способ позволяет проводить предварительную диагностику без разборки подвески, что повышает эффективность технического обслуживания.

Ключевые слова: диагностика технического состояния, подвеска автомобиля, передаточная функция, вещественный интерполяционный метод, параметрическая идентификация.

Введение

Подвеска автомобиля играет ключевую роль в обеспечении безопасности, управляемости и комфорта. Её неисправности, такие как износ пружин или амортизаторов, приводят к ухудшению динамических характеристик транспортного средства: увеличению крена кузова при маневрировании и торможении [1], снижению сцепления шин с дорогой, увеличению тормозного пути [2; 3] и риску аварий. Традиционные методы диагностики подвески часто требуют её разборки, что увеличивает время и стоимость обслуживания. В связи с развитием интеллектуальных транспортных систем и превентивного обслуживания актуальны методы, основанные на анализе вибрационных характеристик и математическом моделировании.

В данной работе предложен способ безразборной диагностики технического состояния подвески автомобиля на основе анализа параметров её математической модели.

Математическая модель подвески

Рассмотрим получение эквивалентной линейной модели подвески автомобиля на примере подвески Макферсона. На рисунке 1а приведена схема подвески Макферсона, где a – горизонтальное расстояние между шарниром нижнего рычага и точкой пересечения оси колеса с осью амортизационной стойки, b – горизонтальное расстояние от шарнира нижнего рычага до центра колеса, α – угол наклона амортизационной стойки, k – жёсткость пружины, c – коэффициент демпфирования амортизатора, x – вертикальное перемещение неподдрессоренной массы подвески, y – вертикальное перемещение поддрессоренной массы подвески.

Эквивалентную линейную модель представим в виде одномассовой колебательной системы (рис. 1б):

$$m\ddot{y} = -k_{eq}(y - x) - c_{eq}(\dot{y} - \dot{x}),$$

где m – масса автомобиля, приходящаяся на подвеску, k_{eq} – эквивалентная жёсткость пружины, c_{eq} – эквивалентный коэффициент демпфирования амортизатора. Связь между эквивалентными и действительными параметрами пружины и амортизатора будут следующими [4, с. 888]:

$$k_{eq} = k \left(\frac{a}{b} \cos \alpha \right)^2,$$
$$c_{eq} = c \left(\frac{a}{b} \cos \alpha \right)^2.$$

Получим передаточную функцию эквивалентной линейной модели подвески. Примем вертикальное перемещение неподдрессоренной массы подвески x в качестве входного сигнала, а вертикальное перемещение поддрессоренной массы подвески y в качестве выходного сигнала системы. Тогда получим передаточную функцию подвески:

Оценка значений коэффициентов передаточной функции:

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + 1},$$

производится путём решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} b_m \delta_1^m + b_{m-1} \delta_1^{m-1} + \dots + b_0 - a_n \delta_1^n W(\delta_1) - \dots - a_1 \delta_1 W(\delta_1) = W(\delta_1), \\ b_m \delta_2^m + b_{m-1} \delta_2^{m-1} + \dots + b_0 - a_n \delta_2^n W(\delta_2) - \dots - a_1 \delta_2 W(\delta_2) = W(\delta_2), \\ \vdots \\ b_m \delta_\eta^m + b_{m-1} \delta_\eta^{m-1} + \dots + b_0 - a_n \delta_\eta^n W(\delta_\eta) - \dots - a_1 \delta_\eta W(\delta_\eta) = W(\delta_\eta). \end{cases}$$

Примем во внимание, что для передаточной функции подвески (1) $a_l = b_l$, поэтому система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} b_0 - a_2 \delta_1^2 W(\delta_1) + a_1 \delta_1 (1 - W(\delta_1)) = W(\delta_1), \\ b_0 - a_2 \delta_2^2 W(\delta_2) + a_1 \delta_2 (1 - W(\delta_2)) = W(\delta_2), \\ b_0 - a_2 \delta_3^2 W(\delta_3) + a_1 \delta_3 (1 - W(\delta_3)) = W(\delta_3). \end{cases}$$

Получив значения коэффициентов передаточной функции, можно определить параметры модели подвески:

$$k_{eq} = \frac{m}{a_2},$$

$$c_{eq} = a_1 k_{eq}.$$

Также в ходе определения коэффициентов передаточной функции был получен статический коэффициент передачи b_0 , который на практике является хорошим индикатором уменьшения дорожного просвета автомобиля и, следовательно, износа пружины подвески.

Описание эксперимента

Для определения коэффициентов передаточной функции подвески необходимо получить сигналы вертикального перемещения непрорессоренной $x(t)$ и прорессоренной $y(t)$ масс подвески. Для этого на корпус амортизатора или поворотный кулак и на опору амортизационной стойки устанавливаются акселерометры для измерения вертикального ускорения непрорессоренной и прорессоренной масс подвески (рисунок 2). Вычисление сигналов перемещения осуществляется путём двойного интегрирования предварительно отфильтрованных сигналов ускорений любым численным методом (метод прямоугольников, метод трапеций, метод Симпсона и пр.).

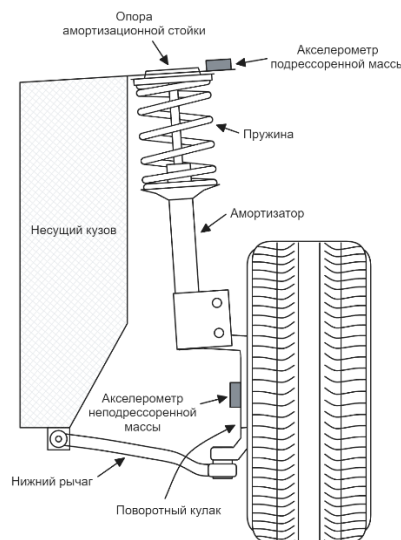


Рис. 2. Схема расположения акселерометров в подвеске автомобиля

Для возбуждения колебаний в подвеске автомобиль должен наехать колесом диагностируемой подвески на специальное препятствие. Форма и размер препятствия будут в значительной

степени влиять на точность определения коэффициентов передаточной функции подвески. Рекомендуемой формой препятствия является ступенчатая форма, так как она является наиболее информативной с точки зрения оценки динамики системы. Кроме того, ступенчатая форма препятствия предпочтительна из-за наличия шины, которая «сгладит» рельеф препятствия. Использование формы препятствия с небольшим наклоном (например, линейно возрастающий профиль препятствия) может дать недостаточные информативные сигналы для определения коэффициентов передаточной функции.

Алгоритм диагностики технического состояния подвески

Предлагаемый в данной работе способ диагностики позволяет выполнить качественный анализ технического состояния подвески путём сопоставления сигнала вертикального перемещения подрессоренной массы $y(t)$ с эталонным и получить количественную оценку состояния подвески в виде значений коэффициента жёсткости k или k_{eq} , коэффициента демпфирования c или c_{eq} и статического коэффициента передачи b_0 и их отклонений от эталонных значений.

Относительные отклонения коэффициентов жёсткости δk , демпфирования δc и статического коэффициента передачи δb_0 от эталонных значений определяют согласно выражениям:

$$\delta k = \frac{k_{eq} - k_{eq}^{ref}}{k_{eq}^{ref}} \cdot 100\%,$$

$$\delta c = \frac{c_{eq} - c_{eq}^{ref}}{c_{eq}^{ref}} \cdot 100\%,$$

$$\delta b_0 = \frac{b_0 - b_0^{ref}}{b_0^{ref}} \cdot 100\%.$$

где k_{eq}^{ref} , c_{eq}^{ref} и b_0^{ref} – эталонные значения коэффициента жёсткости, демпфирования и статического коэффициента передачи, соответственно.

Полученные значения относительных отклонений коэффициентов сравнивают с допустимыми пределами отклонения коэффициента жёсткости δk^{max} , демпфирования δc^{max} , и статического коэффициента передачи δb_0^{max} . Допустимые пределы отклонений индивидуальны для каждой модели автомобиля и должны задаваться исходя из влияния параметров пружины и амортизатора на динамику автомобиля. Если абсолютные величины отклонений δk , δc и δb_0 не превышают пределы отклонений δk^{max} , δc^{max} и δb_0^{max} , то можно сделать заключение о исправности подвески. Если абсолютные величины отклонений δk и δb_0 превышают пределы отклонений δk^{max} и δb_0^{max} , то это свидетельствует о неисправности пружины подвески. Если абсолютная величина отклонения δc превышает предел отклонения δc^{max} , то это свидетельствует о неисправности амортизатора подвески.

Эталонные сигналы и значения коэффициентов предлагается получать описанным в данной работе способом на исправной подвеске автомобиля такой же модели, как и диагностируемый автомобиль. Наилучшую точность диагностики можно добиться, если эталонные сигналы и значения удастся получить на новом автомобиле перед введением его в эксплуатацию и использовать их для последующей диагностики этого же автомобиля.

Апробация алгоритма диагностики технического состояния подвески

Проверка работы алгоритма была выполнена на данных, полученных в ходе симуляции работы подвески автомобиля на базе физического движка Project Chrono. Для моделирования автомобилей в Project Chrono существует модуль Chrono::Vehicle, который предоставляет широкий набор шаблонов для различных подсистем колёсных и гусеничных транспортных средств [6]. Симуляция позволяет изменять параметры пружин и амортизаторов подвески, тем самым имитируя неисправности подвески.

Были проведены 3 симуляции, в ходе которых автомобиль преодолевал одним колесом ступенчатое препятствие высотой 10 см, при диаметре колеса 94 см. Каждый эксперимент отличается техническим состоянием подвески: в первом опыте подвеска полностью исправна, во втором жёсткость пружины уменьшена на 40%, в третьем коэффициент жёсткости амортизатора умень-

шен на 40%. На рисунке 3 представлено сравнение вертикальных перемещений поддрессоренной массы автомобиля по итогам проведённых симуляций.

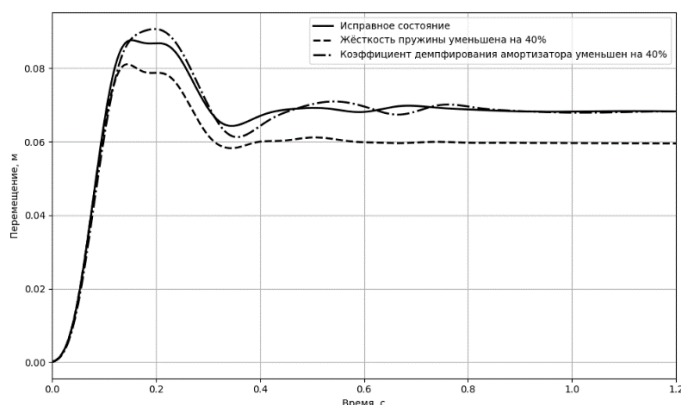


Рис. 3. Сравнение вертикальных перемещений поддрессоренной массы в зависимости от технического состояния подвески

Сравнение графиков на рисунке 3, относящееся к качественному анализу результатов диагностики, показывает, что:

- изменение свойств пружины – уменьшение её жёсткости – влечёт за собой просадку автомобиля;
- износ амортизатора повлечёт за собой повышение колебательности системы.

По имеющимся графикам переходного процесса исправной и диагностируемой подвесок можно качественно оценить техническое состояние подвески путём сравнительного анализа графиков. Дальнейшая работа по формированию суждения об исправности/неисправности подвески должна опираться на технические параметры подвески и их допустимые значения.

Для диагностируемой модели автомобиля предварительно зададим следующие пределы отклонения коэффициентов:

$$\delta_k^{max} = 15\%, \delta_{c_{eq}}^{max} = 8\%, \delta_{b_0}^{max} = 10\%.$$

Полученные значения коэффициентов жёсткости k_{eq} , демпфирования c_{eq} и статического коэффициента передачи b_0 диагностируемой подвески приведены в таблице. Во втором эксперименте коэффициент жёсткости k_{eq} уменьшился на 24,51 % относительно исправного состояния, что превышает допустимый предел 15 %, статический коэффициент передачи b_0 уменьшился на 12,5 %, что превышает допустимый предел 8 %, коэффициент демпфирования c_{eq} уменьшился на 0,26 %, что не превышает допустимого предела 10 %. Данный результат свидетельствует о наличии неисправности пружины в диагностируемой подвеске. В третьем эксперименте коэффициент жёсткости k_{eq} уменьшился на 11,92 % относительно исправного состояния, что не превышает допустимый предел 15 %, статический коэффициент передачи b_0 не изменился, коэффициент демпфирования c_{eq} уменьшился на 22,54 %, что превышает допустимый предел 10 %. Данный результат свидетельствует о наличии неисправности амортизатора в диагностируемой подвеске.

Таблица

Результаты определения параметров подвески автомобиля

№	Состояние подвески	Коэффициент жёсткости k_{eq} , кНм	Статический коэффициент передачи b_0	Коэффициент демпфирования c_{eq} , кНм/с
1	Исправное состояние	234.02	0.72	11.67
2	Снижена жёсткость пружины	176.67	0.63	11.64
3	Снижено демпфирование амортизатора	206.13	0.72	9.04

Заключение

В работе предложен способ диагностики технического состояния подвески на основе оценки параметров её модели. Получена эквивалентная линейная модель подвески в виде передаточной

функции. Предложен способ определения коэффициентов передаточной функции на базе вещественного интерполяционного метода. Проведена апробация способа диагностики на данных, полученных из компьютерной симуляции. Результаты проверки работоспособности способа диагностики подтверждают корреляцию между техническим состоянием подвески и значениями коэффициентов жёсткости, демпфирования и статического коэффициента передачи.

Заявленный способ диагностики технического состояния подвески автомобиля позволяет проводить предварительную диагностику без её разборки путём сравнения графиков вертикального перемещения поддрессоренной массы автомобиля с эталонным и сравнения отклонений коэффициентов жёсткости, демпфирования и статического коэффициента передачи с их пределами отклонений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Guba S., Ko Y., Rizzoni G., Heydinger G.J., Guenther D.A., Wittman T. The Impact of Worn Shocks on Vehicle Handling and Stability // *SAE International*. 2006. DOI: 10.4271/2006-01-0563.
2. Calvo J.A., Díaz V., San Román J.L., García-Pozuelo D. Influence of shock absorber wearing on vehicle brake performance // *International Journal of Automotive Technology*. 2008. Vol. 9. № 4. P. 467-472 – DOI 10.1007/s12239-008-0056-z.
3. Konieczny Ł., Burdzik R., Warczek J., Jaworski R., Śleziak B. Braking Efficiency Determined Using an Accelerometers in the Aspect fo Technical Condition of Shock Absorber // *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. № 2. P. 81-90. DOI 10.20858/tp.2018.13.2.8.
4. Jazar R.N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application* // Springer US. 2008. P. 883-930. DOI 10.1007/978-0-387-74244-1_14.
5. Goncharov V., Aleksandrov I., Rudnicki V., Liepinsh A. Real Interpolation Method for Automatic Control Problems Solution // LAP Lambert Academic Publishing. 2014. C. 300. ISBN: 978-3-659-53716-5.
6. Serban R., Taylor M., Negrut D., Tasora A. Chrono::Vehicle: template-based ground vehicle modeling and simulation // *International Journal of Vehicle Performance*. 2019. Vol. 5. № 1. P. 18. DOI: 10.1504/IJVP.2019.097096.

Брылев Олег Александрович

Аспирант Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30
тел.: +7 (913) 809-23-17
e-mail: oab12@tpu.ru

Гончаров Валерий Иванович

д.т.н., профессор-консультант Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30
тел.: +7 (3822) 701777 вн.т. 5245
e-mail: gvi@tpu.ru

Розум Денис Иванович

Независимый исследователь, тел.: +7 (913) 841-06-89
e-mail: Rozum_D@mail.ru

O.A. BRYLEV, V.I. GONCHAROV, D.I. ROZUM

DIAGNOSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF A VEHICLE SUSPENSION BASED ON ESTIMATION OF MODEL PARAMETERS

The article proposes a non-disassembling diagnostic method for assessing the technical condition of an automobile suspension based on the estimation of model parameters. An equivalent linear model of the MacPherson-type suspension, represented as a transfer function, is examined. The real interpolation method is employed to determine the transfer function coefficients, enabling the evaluation of equivalent spring stiffness, damping coefficient, and static transfer coefficient. The method was tested using data from computer simulations in the Project Chrono environment, which emulates various suspension conditions. The results demonstrate that deviations in model parameters from reference values correlate with the wear of springs and shock absorbers. The proposed method allows preliminary diagnostics without disassembling the suspension, thereby improving maintenance efficiency.

Keywords: diagnosis of the technical condition, car suspension, transfer function, real interpolation method, parameter identification.

REFERENCES

1. Guba S., Ko Y., Rizzoni G., Heydinger G.J., Guenther D.A., Wittman T. The Impact of Worn Shocks on Vehicle Handling and Stability. *SAE International*. 2006. DOI: 10.4271/2006-01-0563.

2. Calvo J.A., Díaz V., San Román J.L., García-Pozuelo D. Influence of shock absorber wearing on vehicle brake performance. *International Journal of Automotive Technology*. 2008. Vol. 9. № 4. P. 467-472. DOI 10.1007/s12239-008-0056-z.
3. Konieczny Ł., Burdzik R., Warczek J., Jaworski R., Śleziak B. Braking Efficiency Determined Using an Accelerometers in the Aspect fo Technical Condition of Shock Absorber. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. № 2. P. 81-90. DOI 10.20858/tp.2018.13.2.8.
4. Jazar R.N. Vehicle Dynamics: Theory and Application. *Springer US*. 2008. P. 883-930. DOI 10.1007/978-0-387-74244-1_14.
5. Goncharov V., Aleksandrov I., Rudnicki V., Liepinsh A. Real Interpolation Method for Automatic Control Problems Solution. *LAP Lambert Academic Publishing*. 2014. P. 300. ISBN: 978-3-659-53716-5.
6. Serban R., Taylor M., Negrut D., Tasora A. Chrono::Vehicle: template-based ground vehicle modelling and simulation. *International Journal of Vehicle Performance*. 2019. Vol. 5. № 1. P. 18. DOI: 10.1504/IJVP.2019.097096.

Brylev Oleg Alexandrovich

PhD student of School of Computer Science & Robotics,
Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave, 30, Tomsk, Tomsk Oblast, Russia, 634050
Phone.: +7 (913) 809-23-17
e-mail: oab12@tpu.ru

Goncharov Valery Ivanovich

Doctor of Technical Sciences,
Professor of School of Computer Science & Robotics,
Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave, 30, Tomsk, Tomsk Oblast, Russia, 634050
Phone: +7 (3822) 701777
ext. 5245
e-mail: gvi@tpu.ru

Rozum Denis Ivanovich

Independent Researcher,
Phone.: +7 (913) 841-06-89
e-mail: Rozum_D@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ САРТСНА В ТЕКСТОВОМ ФОРМАТЕ

Автоматизация тестирования web-приложений нередко осложняется необходимостью взаимодействия с защитными механизмами, такими как текстовые САРТСНА. Для преодоления этого препятствия в данной работе предлагается метод автоматического распознавания САРТСНА с использованием нейросетевых моделей. Разработанная архитектура ориентирована на устойчивое определение символов в искажённых и зашумлённых изображениях, характерных для САРТСНА, что позволяет повысить надёжность и полноту автоматизированных тестов. Представлены результаты обучения модели на специализированном датасете и проведена оценка её точности в различных условиях. Полученные данные демонстрируют потенциал предлагаемого подхода в рамках задач обеспечения бесперебойной работы автоматизированных средств тестирования.

Ключевые слова: САРТСНА, автоматизированное распознавание, нейронная сеть, TensorFlow, OCR, Tensoract, CRNN, Seq-to-Seq, Python.

Введение

САРТСНА (Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart) представляет собой широко используемый механизм защиты web-ресурсов от автоматизированного доступа, спама и несанкционированного извлечения данных. На сегодняшний день текстовые САРТСНА, несмотря на появление более продвинутых и «невидимых» форм, остаются распространёнными, в том числе в процессах регистрации, подтверждения действий и защиты от автоматизированных атак.

Автоматизация тестирования веб-приложений требует полноценной имитации пользовательского поведения, включая прохождение защитных механизмов. Одной из актуальных задач является разработка методов, способных автоматически распознавать символы, представленные в виде искажённого текста в САРТСНА-изображениях. Решение данной задачи позволяет существенно повысить эффективность средств автоматизированного тестирования, снижая зависимость от ручных проверок.

Настоящая работа направлена на разработку и реализацию нейросетевой модели, способной эффективно распознавать текстовые САРТСНА. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведён анализ структуры текстовых САРТСНА на основе открытых источников, включая допустимые символы и типичные виды искажений.
2. Выбрана архитектура нейронной сети, соответствующая требованиям к точности и устойчивости распознавания.
3. Подготовлен специализированный набор данных, отражающий возможные варианты искажений в САРТСНА.
4. Осуществлено обучение модели на подготовленном датасете.
5. Проведена тестовая проверка качества распознавания и оценка эффективности модели.

Современная реализация текстовых САРТСНА

Современные текстовые САРТСНА обычно состоят из букв и цифр. Зачастую используются символы латинского алфавита (как прописные, так и строчные) и цифры от 0 до 9. Но обычно реализации исключают символы, которые могут быть легко перепутаны, например, буквы «O» и цифру «0», буквы «I» и «l» и тому подобное. Рекомендуемый набор символов в генераторах на некоторых CRM платформах выглядит следующим образом: ABCDEFGHJKLMNPQRSTWXYZ23456789.

Длина последовательности символов в САРТСНА обычно составляет от 4 до 8 символов, что обеспечивает баланс между удобством для пользователя и безопасностью, однако конкретная длина может варьироваться в зависимости от требований системы безопасности.

Для усложнения автоматического распознавания текстовые САРТСНА подвергаются различным искажениям:

1. Геометрические искажения: символы могут быть искажены, повернуты или наклонены, что затрудняет их распознавание автоматическими системами.
 2. Перекрывание символов: символы могут быть расположены близко друг к другу или даже перекрываться, что усложняет их сегментацию и последующее распознавание.
 3. Добавление шума: на изображение могут быть добавлены различные шумы, такие как линии, точки или круги, чтобы затруднить распознавание символов.
 4. Сложные фоны: использование фонов с различными цветами или узорами, что делает выделение символов более сложным.
 5. Нелинейные искажения: применение нелинейных трансформаций к символам, что делает их форму менее предсказуемой для автоматических систем распознавания.
- Эти методы направлены на повышение сложности автоматического распознавания CAPTCHA, сохраняя при этом относительную легкость распознавания для человека.

Подготовка датасета с изображениями и выбор модели нейронной сети

Качество используемого датасета оказывает существенное влияние на итоговую точность работы модели. Для эффективного обучения необходимо, чтобы набор данных соответствовал следующим требованиям:

1. Достаточное количество изображений для каждого символа, что обеспечивает статистическую устойчивость модели.
2. Разнообразие данных, включающее:
 - 2.1. Различные углы наклона символов.
 - 2.2. Вариативность написания символов и их искажения.
 - 2.3. Наличие побочных визуальных элементов, создающих препятствия для распознавания.
 - 2.4. Использование различных шрифтов.
3. Переменная длина последовательностей символов, что позволяет модели адаптироваться к разным формам CAPTCHA.

Включение указанных факторов способствует обучению модели на более широком спектре признаков, что, в свою очередь, повышает её способность к обобщению на ранее невидимых данных.

Поскольку в открытом доступе отсутствует достаточное количество данных для формирования сбалансированного датасета, было принято решение о генерации синтетических изображений с использованием специализированных библиотек. В качестве основного инструмента выбрана библиотека `captcha` на языке Python, обладающая необходимым функционалом для создания изображений CAPTCHA с заданными параметрами. Данная библиотека поддерживает генерацию изображений с пользовательскими шрифтами и различными эффектами искажений, что исключает необходимость привлечения дополнительных инструментов.

После создания изображений все они прошли этапы предобработки, направленные на улучшение качества данных и повышение эффективности обучения модели. Предобработка включала следующие этапы:

1. Преобразование изображений в градации серого для уменьшения количества каналов и снижения вычислительной нагрузки.
2. Бинаризация изображений с целью получения контрастного представления символов (белый текст на черном фоне)
3. Удаление шумов и фона с использованием морфологических операций, в частности, дилатации.

Примеры сгенерированных и предобработанных CAPTCHA приведены на рисунке ниже:



Рис. 1. Примеры CAPTCHA для распознавания:

а – сгенерированное изображение; б – изображение после предобработки

Для распознавания текста с переменной длиной последовательности в задачах CAPTCHA наиболее часто применяются следующие архитектуры нейронных сетей:

1. Оптическое распознавание символов (OCR).
2. Рекуррентные сверточные нейронные сети (CRNN).
3. Архитектуры последовательного обучения (Seq-to-Seq).

С целью выбора наиболее эффективной модели были реализованы и протестированы все указанные подходы, после чего была выбрана архитектура, обеспечивающая наилучшую точность предсказаний.

Для обучения моделей был сформирован датасет из 100 000 изображений CAPTCHA, содержащих случайные последовательности символов длиной от 4 до 7. Такой объем данных позволяет добиться высокой обобщающей способности модели и снизить вероятность переобучения.

Оптическое распознавание символов (OCR Tesseract)

Изначально предполагалась реализация модели с использованием OCR, поскольку такие системы изначально разрабатывались для задач оптического распознавания текста. В качестве конкретной модели был выбран Tesseract.

Tesseract является одной из наиболее популярных систем OCR с открытым исходным кодом. Tesseract поддерживает более 100 языков, включая сложные письменности. В версии 4.0 в модель была интегрирована нейронная сеть на основе долговременной краткосрочной памяти (LSTM), что позволило существенно повысить точность распознавания, особенно при обработке сложных шрифтов и рукописного текста.

Для решения поставленной задачи предполагалось использовать предобученную модель Tesseract и дообучить её на специализированном датасете, содержащем изображения CAPTCHA с характерными искажениями. Однако в ходе экспериментов было установлено, что точность распознавания последовательностей символов целиком составляла 0%, а точность для отдельных символов оказалась крайне низкой. Это связано с тем, что архитектура Tesseract недостаточно устойчива к искажениям, характерным для CAPTCHA, таким как деформация символов, наложение шумов и изменение углов наклона.

Таким образом, было принято решение отказаться от использования Tesseract в пользу более адаптированных к данной задаче моделей, таких как сверточные рекуррентные нейронные сети (CRNN) или модели последовательного обучения (Seq-to-Seq), обладающие высокой устойчивостью к вариативности и искажениям, характерным для CAPTCHA.

Сверточные рекурсивные нейронные сети (CRNN)

Сверточно-рекуррентные нейронные сети (CRNN) представляют собой гибридную архитектуру, сочетающую в себе возможности сверточных нейронных сетей (CNN) и рекуррентных нейронных сетей (RNN). Данный подход используется в задачах, связанных с обработкой последовательных данных, таких как распознавание текста, речь и видео.

Основное преимущество CRNN заключается в способности CNN-части извлекать пространственные признаки из изображений, тогда как RNN-часть позволяет учитывать временные зависимости между последовательными фрагментами данных.

Разработанная модель CRNN для распознавания CAPTCHA включает в себя три ключевых блока:

1. Сверточный блок (CNN): предназначен для выделения признаков из изображений CAPTCHA. Включает в себя три последовательных сверточных слоя, а также методы нормализации и уменьшения размерности признакового пространства.
2. Рекуррентный блок (RNN): использует двунаправленные слои GRU, позволяющие модели учитывать зависимость между последовательными символами в CAPTCHA.
3. Выходной слой: полносвязный слой, который выполняет классификацию каждого символа в последовательности.

В данной архитектуре применяются слои Dropout для регуляризации, также используется L2-регуляризация, BatchNormalization для ускорения обучения и повышения устойчивости модели, а также функция softmax для предсказания классов символов.

После обучения данной модели результаты оказались превосходными показатели OCR, однако все же не достигли удовлетворительного уровня. В частности, точность распознавания всей

последовательности символов не превышала 10%, тогда как точность классификации отдельных символов составляла около 70%.

Архитектура последовательного обучения (Seq-to-Seq)

Модели последовательного преобразования (Seq-to-Seq) широко применяются для задач, связанных с обработкой последовательностей переменной длины. Они используются в таких областях, как машинный перевод, распознавание речи и анализ текстов. Данные модели основаны на архитектуре энкодера-декодера, где первый модуль кодирует входную последовательность в скрытое представление, а второй декодирует его в выходную последовательность.

Одним из ключевых элементов Seq-to-Seq является механизм внимания, который позволяет декодеру динамически фокусироваться на различных частях входной последовательности при генерации выходных символов. Этот подход особенно полезен для распознавания CAPTCHA, так как символы в изображениях могут иметь разную ориентацию и степень искажения.

Кодировщик, в данной модели принимает входное изображение CAPTCHA и преобразует его в компактное представление. Архитектура кодировщика включает:

1. Четыре сверточных блока, слои пакетной нормализации и слои подвыборки для понижения размерности входных данных
2. Глобальный усредненный слой для получения векторного представления изображения.
3. Полносвязный слой для финального представления скрытого состояния
4. Рекуррентный слой для кодирования последовательности, возвращающий последнее скрытое состояние кодировщика.

Декодировщик выполняет пошаговую генерацию выходной последовательности, используя скрытое состояние кодировщика. В архитектуру декодировщика входят:

1. Входной слой для последовательности токенов.
2. Слой вложения, который преобразует входные токены в векторные представления.
3. Рекуррентный слой, обрабатывающий последовательность с учетом скрытого состояния кодировщика.
4. Механизм внимания, который позволяет декодеру учитывать релевантные части входного изображения.
5. Полносвязный слой с функцией активации softmax для предсказания вероятностей символов.

На начальных этапах экспериментов предложенная Seq-to-Seq-модель показала наилучшие результаты среди рассмотренных вариантов. В отличие от OCR- и CRNN-моделей, данная архитектура смогла достичь более высокой точности распознавания последовательностей символов, что обусловлено применением механизма внимания. Дальнейшая работа с моделью была сосредоточена на её оптимизации и улучшении параметров обучения.

Тестирование модели нейронной сети

Как было установлено в предыдущих разделах, модель последовательного преобразования (Seq-to-Seq) продемонстрировала наилучшие результаты среди рассмотренных архитектур. Следующим этапом работы являлась оптимизация параметров модели, включая веса и коэффициенты регуляризации, с целью ускорения сходимости, минимизации риска переобучения и повышения точности распознавания целевых последовательностей.

Для проведения экспериментов исходный набор данных, содержащий 100 000 изображений, был случайным образом перемешан и разделён на три подмножества: обучающее, тестовое и валидационное в соотношении 80:10:10. Обучающая выборка использовалась непосредственно для обучения модели, валидационная — для контроля качества процесса обучения на каждой эпохе, а тестовая — для окончательной оценки модели на данных, с которыми она ранее не сталкивалась. В качестве основных метрик качества модели использовались функция потерь (loss) и точность (ассигасу), рассчитываемая для каждого символа последовательности.

В процессе многократного обучения были экспериментально определены оптимальное количество эпох и значения гиперпараметров, обеспечивающие эффективное снижение функции потерь до приемлемых значений. График сходимости функции потерь представлен ниже.

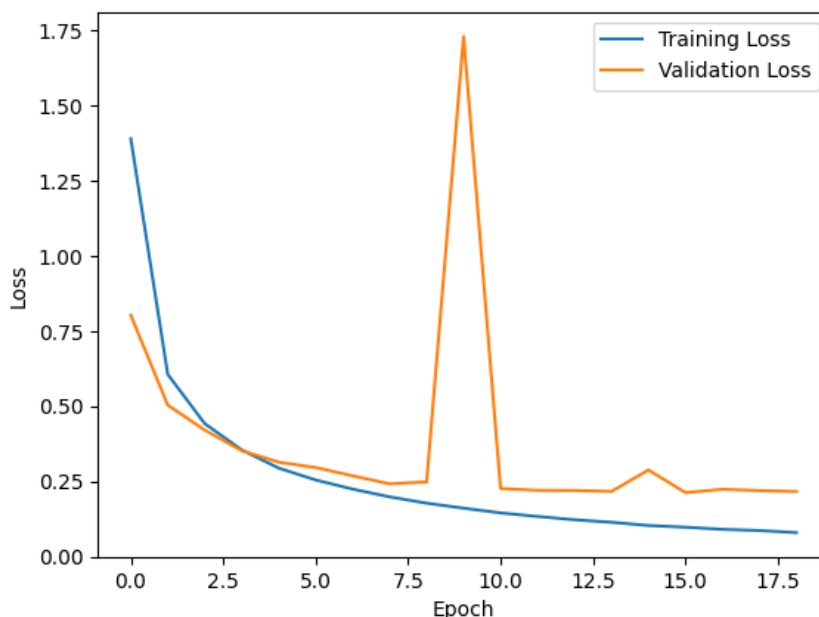


Рис. 2. График сходимости функции потерь

Для предотвращения переобучения использовался механизм ранней остановки, согласно которому обучение прекращалось при отсутствии уменьшения значения функции потерь на валидационной выборке в течение трёх последовательных эпох. В данном эксперименте обучение завершилось на 18-й эпохе. На графике видно, что функция потерь стабилизировалась после 10 эпохи, поэтому 10 эпоха является балансом между точностью распознавания последовательностей и скоростью обучения модели.

Анализ графика сходимости функции потерь показывает наличие резкого увеличения её значения на 9-й эпохе, что может быть обусловлено следующими факторами:

1. Перемешивание данных перед каждой эпохой могло привести к образованию несбалансированной выборки, содержащей значительное число сложных примеров.

Динамическое изменение скорости обучения, осуществляемое с помощью механизма регулирования скорости обучения (learning rate scheduler), могло повлиять на изменение функции потерь.

Окончательная точность распознавания отдельных символов составила 0.9263.

После подбора оптимальных значений гиперпараметров модель была сохранена и протестирована на валидационной выборке. Точность распознавания последовательностей различной длины представлена в таблице.

Таблица

Точность предсказаний для последовательностей различной длины

Длина последовательности	Точность распознавания
4 символов	0.9305
5 символов	0.7450
6 символов	0.4575
7 символов	0.1915

Также была построена матрица ошибок, позволяющая проанализировать частоту и характер ошибок модели при классификации различных классов.

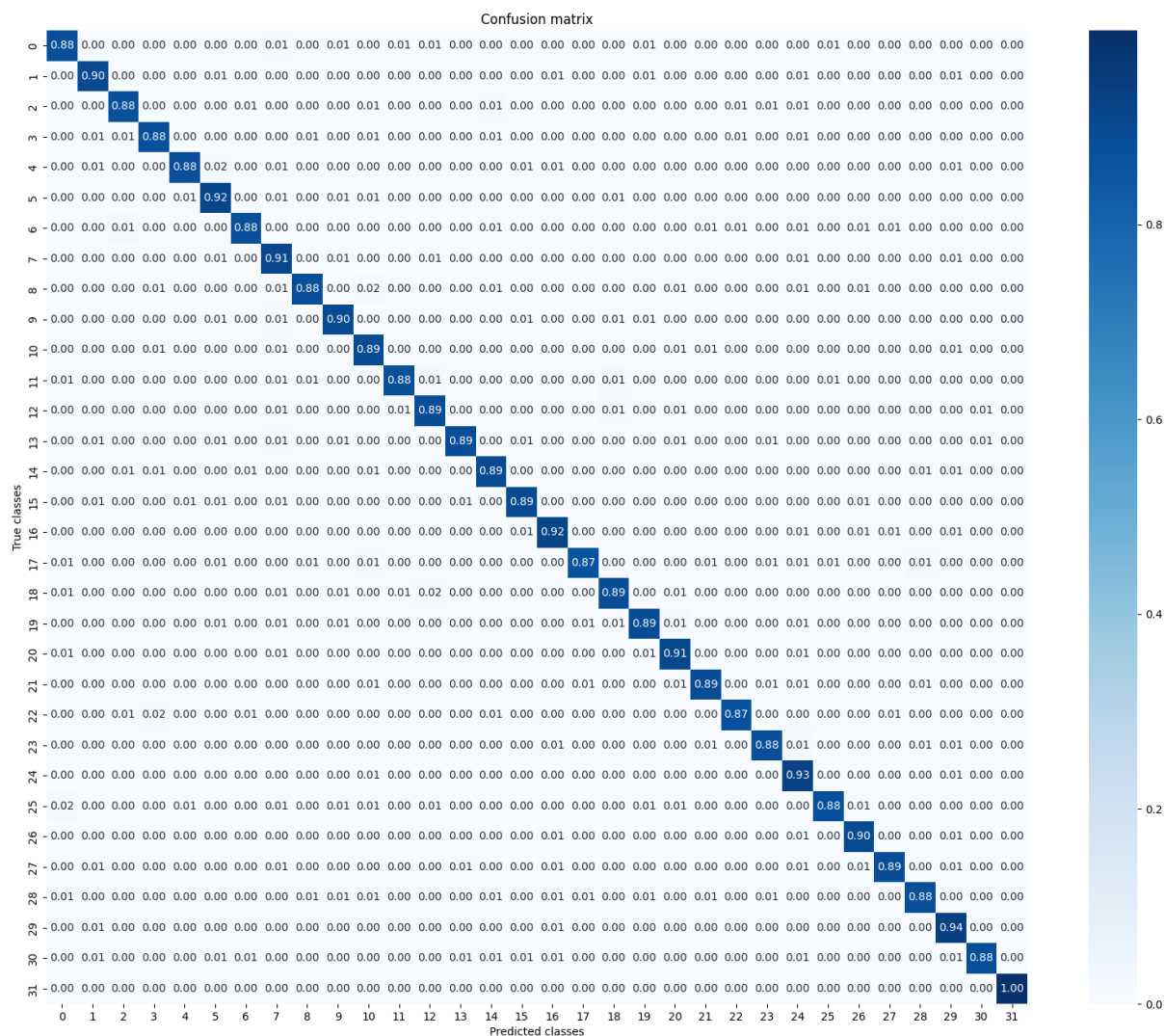


Рис. 3. График матрицы ошибок распознавания моделью отдельных символов

Анализ полученных результатов показывает, что точность распознавания последовательностей значительной длины остаётся относительно низкой. Это можно объяснить высокой зависимостью модели Seq-to-Seq от объёма обучающих данных: для эффективного обобщения признаков, извлекаемых из изображений, требуется значительное количество примеров. Следовательно, увеличение размера обучающего набора данных потенциально может способствовать повышению точности модели, однако это также накладывает дополнительные требования к вычислительным ресурсам, необходимым для её обучения.

Заключение

Для решения задачи по автоматизированному решению текстовых CAPTCHA была разработана и реализована нейросетевая модель, основанная на архитектуре Seq-to-Seq. Проведён анализ структуры текстовых CAPTCHA, включая допустимые символы и характерные виды искажений, на основе чего был сформирован специализированный датасет объёмом 100 000 изображений. Модель обучалась на данных с переменной длиной последовательностей символов, что позволило повысить универсальность решения.

Результаты тестирования продемонстрировали способность модели эффективно распознавать текстовые CAPTCHA различной сложности, подтверждая её применимость в задачах автоматизации тестирования web-приложений. Полученные данные могут быть использованы как для улучшения средств тестирования, так и для анализа устойчивости CAPTCHA-систем, применяемых на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. CAPTCHA in 1C-Bitrix [Electronic resource]. https://dev.1c-bitrix.ru/user_help/settings/settings/captcha.php
2. What is a CAPTCHA and how does it work [Electronic resource]. <https://ru-brightdata.com/blog/web-data-ru/what-is-a-captcha>
3. «Break me completely!» How some algorithms generate CAPTCHAs and others break them [Electronic resource]. <https://proglab.io/p/lomay-menya-polnostyu-kak-odni-algoritmy-generiruyut-kapchu-a-drugie-ee-vzlamyvayut-2020-03-05>
4. Rogov A. V. CAPTCHA in the era of digital threats: evolution, vulnerabilities, and solutions // *Scientific Statements*. 2024. No. 21(68). P. 18–22.
5. How to configure CAPTCHA [Electronic resource]. <https://support.simai.ru/learn/courses/course/3/lesson/309/>
6. Tesseract OCR: How it works and when to use it [Electronic resource]. <https://www.klippa.com/en/blog/information/tesseract-ocr>
7. Tesseract project GitHub repository [Electronic resource]. <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>
8. Training Tesseract OCR with custom data [Electronic resource]. <https://saiashish90.medium.com/training-tesseract-ocr-with-custom-data-d3f4881575c0>
9. Once again about handwritten text recognition, this time using CRNN [Electronic resource]. <https://habr.com/ru/articles/720614/>
10. Bezvikonny N. V., Guskov A. A. Software emulation of an optomagnetic neural network for handwritten text analysis // *World of Science*. 2024. P. 1–63.
11. Sequence-to-sequence models [Electronic resource]. <https://www.ultralytics.com/ru/glossary/sequence-to-sequence-models>
12. Morkovnikov N. M., Kipyatkova I. S. Study of encoder-decoder model construction methods for Russian speech recognition // *Information and Control Systems*. 2019. No. 4. P. 1–9.

Калачев Александр Викторович

Доцент каф. Вычислительной техники и электроники,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
Тел.: +7-913-027-84-06
Эл. почта: kalachev@phys.asu.ru

Лаптев Александр Владимирович

Магистрант Института цифровых технологий,
электроники и физики,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр-т. Ленина, 61,
Эл. почта: LaptevAlexander2001@gmail.com

A. V. KALACHEV, A. V. LAPTEV

AUTOMATION OF TEXT-BASED CAPTCHA SOLVING

Automation of web application testing is often complicated by the need to interact with protective mechanisms such as text-based CAPTCHAs. To overcome this challenge, this paper proposes a method for automatic CAPTCHA recognition using neural network models. The developed architecture is designed for robust character recognition in distorted and noisy images typical of CAPTCHAs, which enhances the reliability and completeness of automated tests. The paper presents the results of model training on a specialized dataset and evaluates its accuracy under various conditions. The obtained data demonstrate the potential of the proposed approach in ensuring the uninterrupted operation of automated testing tools.

Keywords: CAPTCHA, automated recognition, neural network, TensorFlow, OCR, Tesseract, CRNN, Seq-to-Seq, Python.

REFERENCES

1. CAPTCHA in 1C-Bitrix [Electronic resource]. https://dev.1c-bitrix.ru/user_help/settings/settings/captcha.php
2. What is a CAPTCHA and how does it work [Electronic resource]. <https://ru-brightdata.com/blog/web-data-ru/what-is-a-captcha>
3. «Break me completely!» How some algorithms generate CAPTCHAs and others break them [Electronic resource]. <https://proglab.io/p/lomay-menya-polnostyu-kak-odni-algoritmy-generiruyut-kapchu-a-drugie-ee-vzlamyvayut-2020-03-05>
4. Rogov A. V. CAPTCHA in the era of digital threats: evolution, vulnerabilities, and solutions. *Scientific Statements*. 2024. No. 21(68). P. 18–22.
5. How to configure CAPTCHA [Electronic resource]. <https://support.simai.ru/learn/courses/course/3/lesson/309/>
6. Tesseract OCR: How it works and when to use it [Electronic resource]. <https://www.klippa.com/en/blog/information/tesseract-ocr>
7. Tesseract project GitHub repository [Electronic resource]. <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>
8. Training Tesseract OCR with custom data [Electronic resource]. <https://saiashish90.medium.com/training-tesseract-ocr-with-custom-data-d3f4881575c0>
9. Once again about handwritten text recognition, this time using CRNN [Electronic resource]. <https://habr.com/ru/articles/720614/>
10. Bezvikonny N. V., Guskov A. A. Software emulation of an optomagnetic neural network for handwritten text analysis. *World of Science*. 2024. P. 1–63.

11. Sequence-to-sequence models [Electronic resource]. – URL: <https://www.ultralytics.com/ru/glossary/sequence-to-sequence-models>
 12. Morkovnikov N.M., Kipyatkova I.S. Study of encoder-decoder model construction methods for Russian speech recognition // Information and Control Systems. 2019. No. 4. P. 1–9.
-

Alexander V. Kalachev

PhD of Physics and Mathematics, Assistant Professor,
Department of Computing Techniques and Electronics
Altai State University
61, Lenina ave., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7-913-027-84-06
E-mail: kalachev@phys.asu.ru

Alexander V. Laptev

2nd-year Master's student, Institute of Digital Technologies,
Electronics and Physics,
Altai State University,
61, Lenin Avenue, Barnaul, Russia, 656049,
E-mail: LaptevAlexander2001@gmail.com

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА

На основании обзора современного состояния и литературы в области неразрушающего исследования тонких металлических пленок рассмотрены основные принципы построения компьютеризированной измерительной системы, работающей под управлением персонального компьютера. Рассмотрены основные принципы построения вихретоковых преобразователей, описана конструкция разработанного накладного трансформаторного миниатюрного вихретокового преобразователя с сердечником из феррита для исследования электропроводности тонких металлических пленок. Предложенным методом были проведены исследования тонкой металлической пленки и показана значительно увеличившаяся точность определения границ и размеров дефектов в результате анализа скорости изменения сигнала ВТП. Увеличение точности составило до 7% по сравнению с анализом непосредственного изменения амплитуды сигнала ВТП.

Ключевые слова: цифровые методы исследований, тонкопленочные структуры, вихретоковые исследования, дефекты, электропроводность, Arduino, системы позиционирования.

Введение

В современном, быстро меняющемся мире научно-техническое направление, взаимосвязанное с получением и применением тонких металлических пленок, приобретает все большую актуальность. За последние десятилетия это направление получает стремительный рост и занимает первостепенные позиции во многих отраслях прогрессивного производства. Тонкие металлические пленки нашли обширное применение в различных областях человеческой деятельности, зачастую используясь в качестве функциональных, упрочняющих, проводящих и светоотражающих покрытий, применяются в различных областях науки, электроники и техники [1]. В условиях научно-технической революции использование тонких металлических пленок в различных областях науки и техники открывает широкие перспективы для создания и совершенствования не только новых приборов, но и целых технологических направлений. Тонкие металлические пленки применяются также в качестве упрочняющих покрытий. В медицине за последние десятилетия возрос спрос на создание гибких и биосовместимых датчиков. Особый интерес представляют биосовместимые датчики давления, используемые в бедренных протезах. При разработке таких датчиков также учитываются требования к износостойкости, коррозионной стойкости и электропроводимости [2]. На данный момент проведены исследования возможности применения покрытий на основе интерметаллидов титана и алюминия.

Одна из особенностей тонких пленок заключается в их разнообразной структуре и специфических свойствах, которые различаются от характеристик тех же материалов в массивном состоянии. Это делает тонкие пленки интересными для физиков, так как на них можно обнаружить новые явления и закономерности, а также объяснить уже известные. Для инженеров исследование тонких пленок открывает возможности для разработки и создания новых устройств и технологий.

Бурно развивающийся рынок ставит все более высокие требования к средствам контроля производимой продукции. В этом контексте исследование и разработка тонких пленок играют важную роль, так как они предоставляют возможность создания новых экспериментальных методов электроанализа и сенсорики.

Для полноценного использования тонких пленок в разнообразных областях электроники необходимо производить контроль толщины и электропроводности пленки, определять степень ее дефектности [3]. Такие данные важны для обеспечения точности и надёжности работы различных электронных устройств, а также позволяют экономить материалы и снижать затраты на производство. Поэтому вопрос выбора метода для поиска дефектов тонких пленок является актуальной задачей. Традиционные методы контроля, основанные на создании электрического контакта с поверхностью пленки, могут вносить изменения в ее свойства, поэтому требуются инновационные подходы и техники контроля. Одним из наиболее перспективным являются методы бесконтактного неразрушающего контроля. Некоторые из них: метод электронной микроскопии, метод ультразвуковой спектроскопии, метод растровой электронной микроскопии, метод магнитной спектроскопии, метод рентгеновской дифрактометрии, метод оптической спектроскопии [3].

Степень дефектов пленки, таких как изменения толщины, трещины, вмятины, часто можно определить невооруженным глазом или с помощью оптической микроскопии. По этой причине быстрый оптический неразрушающий контроль тонких пленок часто применяется вместо более дорогих или более трудоемких методов, таких как профилометрия со щупом, атомно-силовая микроскопия или электронная микроскопия. Количественный анализ дефектов позволяет исследователям выявить потенциальные дефекты в пленке. Исследователи часто выполняют количественный анализ изображений с использованием таких программных инструментов, как ImageJ [11] или анализ шероховатости поверхности с помощью Gwyddion [12]. Однако полуручной анализ становится непрактичным при применении к высокопроизводительным экспериментам или высокоскоростному производству, где изображения тонких пленок генерируются с высокой скоростью или в большем количестве. В таких случаях необходим автоматизированный анализ изображений. Автоматизированный анализ изображений тонкопленочных материалов и устройств часто выполняется с использованием алгоритмов обработки изображений, которые специфичны для исследуемого материала и морфологии. Примером такого подхода является матричный анализ ориентационного

Одним из основных преимуществ метода вихретокового контроля является возможность проведения исследований без необходимости контакта датчика с объектом контроля, что играет важную роль при выборе метода исследования.

Материалы и методы

Вихретоковой контроль включает в себя важный компонент - вихретоковый преобразователь, который специально подбирается для каждой конкретной задачи. В случае контроля дефектов тонких металлических пленок, эффективным является применение накладного трансформаторного вихретокового преобразователя.

Были разработаны несколько конструкций вихретоковых преобразователей, отличающихся формой сердечника, расположением обмоток и количеством витков. На рисунке 1 показана конструкция разработанного накладного трансформаторного преобразователя с конусообразным сердечником из феррита. Этот преобразователь включает три обмотки: возбуждающую, измерительную и компенсационную обмотки (рис. 1).



Рис. 1. Конструкция ВТП: 1 – измерительная обмотка, 2- генераторная обмотка, 3 – компенсационная обмотка

На рисунке 2 представлены результаты моделирования радиального распределения плотности вихревых токов в объекте при взаимодействии с ним вихретокового токопроводящего устройства. Плотность вихревых токов в пленке оценивалась на глубине 1 мкм, а удельная проводимость пленки составила 57 МСм/м. Моделирование проводилось как с ферритовым сердечником (рис. 2-1), так и без сердечника (рис. 2-2).

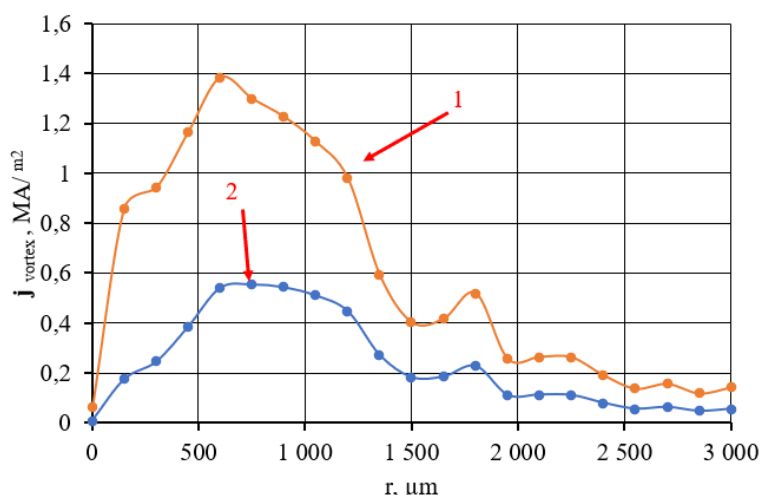


Рис. 2. Радиальное распределение плотности вихревых токов в пленке на глубине 1 мкм:
1) с ферритовым сердечником; 2) без сердечника

По результатам моделирования (рис. 2) можно сделать следующий вывод: введение в модель ферритового сердечника привело к увеличению максимальной плотности вихревых токов в пленке более чем в 2 раза.

В результате проведенного моделирования установлено, что размещение ферромагнитного сердечника внутри катушки позволяет резко увеличить ее индуктивность, так как магнитная проницаемость ферромагнетика существенно больше, чем у воздуха. Кроме того, придав сердечнику необходимую форму, можно сформировать магнитный поток (создаваемый катушкой) необходимой конфигурации для повышения разрешающей способности измерений.

Для получения данных использовался цифровой USB-осциллограф со встроенным АЦП. Был выбран четырехканальный осциллограф модели DSO-6254BD китайского производства Hantek с частотой 1 ГГц и встроенным генератором сигналов с частотой до 25 МГц. Данный осциллограф имеет USB-порт, через который прибор можно подключить к компьютеру.

С учетом поставленных целей, основными принципами разработки аппаратной части были компактность и возможность работы в связке с персональным компьютером (ПК). Схема программно-аппаратного комплекса, разработанная в рамках данного проекта, представлена на рисунке 3.

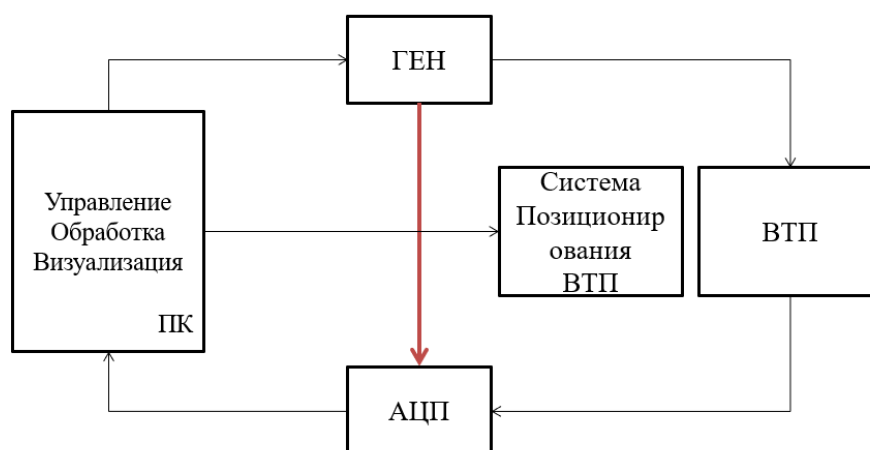


Рис. 3. Блок-схема измерительной системы

Блок управления (ПК) формирует и отправляет команды на генератор (ГЕН) и систему позиционирования ВТП. Генератор, получив управляющий сигнал, генерирует переменный электрический ток заданной частоте. Напряжение из измерительной катушки проходит через аналого-цифровой преобразователь откуда уже в виде цифрового сигнала поступает в блок обработки и визуализации. Красной линией показан канал, по которому передаётся компенсационный сигнал. Генератор построен на основе цифровой системы сбора данных Vernier, и работающей под управ-

лением программного обеспечения, написанном с использованием системы графического программирования Labview.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) — это мощная среда графического программирования, широко используемая для создания систем управления, сбора данных и генерации сигналов. В отличие от традиционных аппаратных генераторов, программная реализация в LabVIEW предлагает гибкость в настройке параметров сигнала, возможность создания сложных модулированных форм и интеграцию с другими измерительными системами.

Основные характеристики DSO 6052BE: два независимых канала, полоса пропускания - 50 МГц, функция Autoset, 150 МС/с (одноканальный режим), 32 автоматических измерения, поддержка LabVIEW, библиотека для разработки приложений Visual C, Visual Basic, математические функции FFT

На входе микросхемы размещены трехсекционный LC-фильтр и малошумящий широкополосный предварительный усилитель на базе микросхемы BGA2711. Для питания микросхем приемника используется малошумящий стабилизатор напряжения на базе AP2114.

Для приема и обработки сигнала, поступающего от модуля, было разработано программное обеспечение на языке Python (рис. 4).

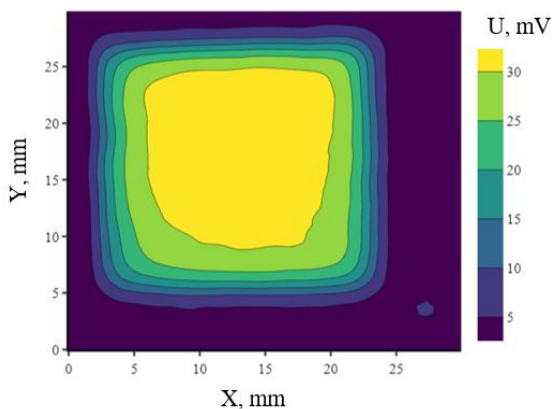


Рис. 4. Графическое изображение результата сканирования объекта исследования в двумерном виде

Результаты экспериментов

В разработанной системе параметром, несущим информацию об объекте контроля, является амплитуда напряжения, вносимого вихревыми токами в измерительную обмотку ВТП, измеряемая модулем АЦП в условных единицах.

Для перевода результатов измерений из условных единиц в электропроводность была построена зависимость отклика системы от эталонов. Градуировочная прямая состоит из трёх точек. Первая точка соответствует нулевой электропроводности (без объекта контроля), вторая точка – электропроводность алюминия, третья – электропроводность меди. Измерения были проведены на высоте 0.5 см.

С целью оценки разрешающей способности разработанного измерительного комплекса при обнаружении дефектов на пленке, был создан искусственный дефект. На рисунке 5 представлены изображения дефекта на пленках, полученные с помощью оптического микроскопа.



Рис. 5. Изображение дефекта плёнки, полученные с использованием оптического микроскопа

На рисунке 6 представлен результат сканирования образца, показывающий распределение электрического отклика объекта контроля.

Основываясь на выводах [1], был проведен анализ скорости изменения сигнала в дефектной области. На рисунке 6 приведены результаты анализа скорости изменения сигнала ВТП при сканировании плёнки с дефектом, выделенная область соответствует изображению, которое получили с помощью оптического микроскопа. Электропроводность по линии сечения выведена на рисунке 7.

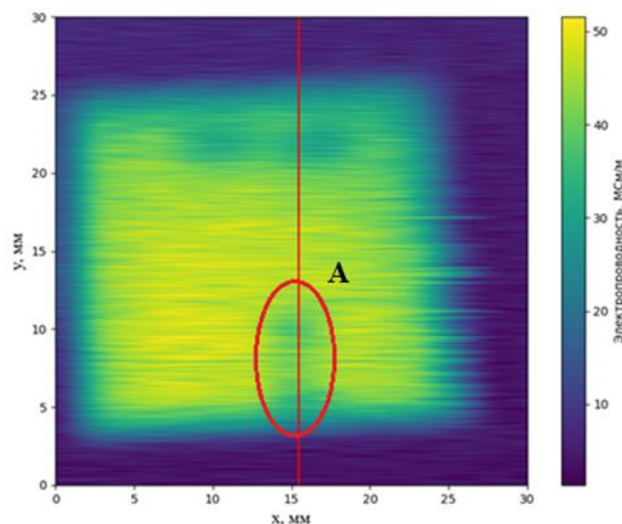


Рис. 6. Результат измерения плёнки с дефектом вихретоковым методом

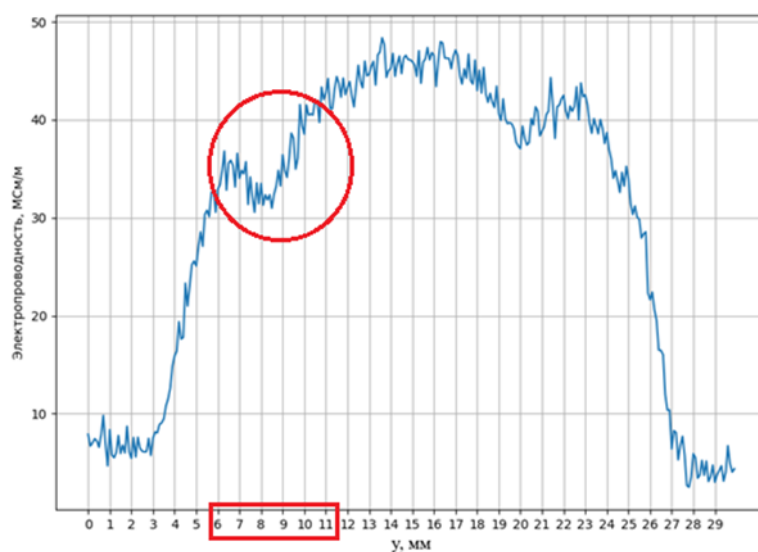


Рис. 7. Результат измерения электропроводности плёнки с дефектом вихретоковым методом

Измерив падение электропроводности в выделенных областях, можно сделать вывод о размере дефектов. Дефект А имеет размер 5 мм, падение электропроводности составляло от 38 МСм/м до 31 МСм/м.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана конструкция вихретокового преобразователя, позволяющая осуществлять локальное сканирование тонких металлических пленок и производить измерения размеров дефектов и неоднородностей, а также сконструирован программно-аппаратный комплекс, предназначенный для экспериментального исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, имеющих толщину от 100 нм и удельную электропро-

водность от 14 МСм/м. Разработан метод анализа скорости изменения сигнала вихретокового преобразователя, позволяющий производить измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки.

Исследование выполнено в рамках реализации Программы развития Алтайского государственного университета на 2021-2030 годы в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», проект «Разработка цифровых измерительных систем для исследования металлов и интерметаллических структур».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gorji N. Degradation sources of CdTe thin film PV: CdCl₂ residue and shunting pinholes // Appl. Phys. A. 2014. Vol. 116. P. 1347-1352.
2. Uchanin V. N. Application of eddy current method for non-destructive testing of welded joints // Engine Building Bulletin. 2011. Vol. 1. P. 89-94.
3. Uchanin V. N. Multidifferential eddy current converters and their application // Techn. diagnostics and non-destructive testing. 2006. Vol. 3. P. 34-41.

Маликов Владимир Николаевич

К.т.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
Тел.: +7-983-172-5918
Эл. почта: osys11@gmail.com

Ишков Алексей Владимирович

Д.т.н., профессор каф. ТКМ и РМ,
Алтайский государственный аграрный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Красноармейский пр-т, д. 90,
Тел.: +7-923-647-0239
Эл. почта: svaritrffi@gmail.com

Фадеев Денис Андреевич

Аспирант каф. общей и экспериментальной физики,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 61,
Тел.: +7-913-054-8754
Эл. почта: svaritrffi@gmail.com

V.N. MALIKOV, A.V. ISHKOV, D.A. FADEEV

DIGITAL METHODS FOR STUDYING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THIN-FILM METAL STRUCTURES USING AN EDDY CURRENT TRANSDUCER

This research aims to develop a subminiature eddy current transducer designed to analyze the electrical conductivity of electrically conductive thin films. The relevance of the problem is determined by the need to take into account the physical properties of thin films used in scientific research and industry. In this work, it becomes possible to study the electrical conductivity of thin metal films based on the analysis of signals obtained using an eddy current transducer. The presented subminiature transformer-type eddy current transducer allows you to effectively localize the electromagnetic field and carry out local changes. The article describes in detail methods and approaches to creating a digital signal generation and amplification system based on Arduino microcontrollers, describes algorithmic methods for positioning sensors with simultaneous signal supply, methods for receiving signals during operation of the control system and software control capable of controlling the measuring system and provides high-quality conversion results in the form of visual images of control objects.

Keywords: digital research methods, eddy current transducer, film, electrical conductivity, copper, Arduino, control systems.

REFERENCES

1. Gorji N. Degradation sources of CdTe thin film PV: CdCl₂ residue and shunting pinholes. Appl. Phys. A. 2014. Vol. 116. P. 1347-1352.
2. Uchanin V. N. Application of eddy current method for non-destructive testing of welded joints. Engine Building Bulletin. 2011. Vol. 1. P. 89-94.
3. Uchanin V. N. Multidifferential eddy current converters and their application. Techn. diagnostics and non-destructive testing. 2006. Vol. 3. P. 34-41.

Vladimir N. Malikov

Ph.D., Associate Professor,
Department. General and Experimental physics,
Altai State University
656049, Russia, Barnaul, Lenina Ave., 61,
Tel.: +7-983-172-5918
E-mail: osys11@gmail.com

Alexey V. Ishkov

Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department. TCM and RM,
Altai State Agrarian University
656049, Russia, Barnaul, Krasnoarmeysky Ave., 90,
Tel.: +7-923-647-0239
E-mail: svaritrffi@gmail.com

Fadeev Denis Andreevich

Aspirant department. General and Experimental physics,
Altai State University
656049, Russia, Barnaul, Lenina Ave., 61,
Tel.: +7-913-054-8754
Эл. почта: svaritrffi@gmail.com

УДК 631.3:626:519.6

И.Ш. КАДЫРОВ, Б.С. ТУРУСБЕКОВ, Б.Ж. ЖАНЫБЕКОВА, М.С.НАРЫМБЕТОВ, С.К. КЕМЕЛОВА

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В материалах этой статьи проводится детальный анализ системы автоматического регулирования возбуждением с тиристорным возбудителем синхронного генератора, установленный по программе модернизации на одной из малой ГЭС (МГЭС) Аламединского каскада взамен электромашинному возбудителю. В результате анализа обозначены выявленные недостатки в системе управления, в силовой части тиристорного возбудителя, а также в системе автоматического регулирования возбуждением (АРВ). Сформулированы предложения для устранения их и даны рекомендации, с помощью которых можно увеличить эффективность производства электрической энергии гидроэлектрической станций. В частности, в систему управления возбудителем введены блоки: для вычисления алгоритма формирования синхронизирующих напряжений в СИФУ ТП; вычисления аварийных токов статора и ротора; вычисления логического напряжения, блокирующего выдачу управляющих импульсов силовым вентилям при возникновении нештатных режимов работы синхронного генератора.

Вычислительные блоки в предлагаемой системе АРВ обеспечивают безопасную эксплуатацию электрооборудования синхронного генератора. Предложена система АРВ, в состав которой введен блок токового компаундирования (БТК) с двухконтурной системой регулирования тока статора СГ: внутренней для регулирования тока ротора, внешней для регулирования тока статора в соответствии с заданным статизмом внешней характеристики СГ. Введение в систему АРВ блока БТК с двухконтурной системой регулирования тока статора СГ позволила исключить дифференциальную составляющую в структуре регулятора напряжения в старой системе, что в значительной мере увеличила запас устойчивости всей системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора.

Ключевые слова автоматическая система, регулирование возбуждения, синхронный генератор, гашение поля, статический режим, динамический режим, тиристорный возбудитель, регулятор напряжения, коэффициент форсировки, токовое компаундирование, синтез регулятора.

Введение

Производство электрической энергии, поступающей в энергосистему Кыргызстана, осуществляется в основном мощными гидроэлектростанциями, которые сосредоточены на юге страны, построенные на реке Нарын. Река Нарын имеет значительные энергоресурсы и протекает на границах трех областей страны, вырабатывая электрическую энергию в объеме, составляющей примерно 80% от общего. Остальные 20% электроэнергии приходятся на ТЭЦ, находящихся в крупных городах Бишкек и Ош и малых ГЭС, на долю которых приходится не более 3% от общей валовой продукции электрической энергии [1].

В тоже время значительная часть потребителей электроэнергии сосредоточены в северных регионах страны, которые до 60-х годов прошлого столетия получали электроэнергию от малых ГЭС, построенных на водных ответвлениях реки Чуй. В настоящее время эти ГЭС после расконсервации вновь вступили в эксплуатацию, однако основное оборудование этих ГЭС должны быть полностью обновлены или подлежат модернизации.

Использование возможностей малой энергетики на территории Кыргызской Республики неограниченны, так как страна в большей части является высокогорной, где протекают множество рек, истоки которых берут начало с крупных ледников. Эти реки протекают на больших высотах, поэтому они уже обладают значительной потенциальной энергией, которые можно преобразовать в электрическую, за счет строительства малых гидроэлектростанций. В последнее время со стороны правительства этой проблеме уделяется большое внимание тем, что принимаются постановления, позволяющие инвесторам оказывать финансирование на строительство малых ГЭС. С учетом того, что суммарный гидроэнергетический потенциал малых горных рек, при расходе от 0.5 до 50 куб. м/сек приблизительно составляет 80 млрд. кВт·ч в год, то этот бизнес привлекателен не только внутренним, но и внешним инвесторам [2].

В связи с этим для многих специалистов-гидроэнергетиков республики появляется возможность разрабатывать условия, благоприятствующие вопросам использования технических характеристик малых водотоков в горных реках, т.е. разрабатывать обоснованные предложения о возможности претворения в жизнь преобразования энергии горных рек в электрическую. Предложения относятся на строительство технически приемлемых вариантов деривационных малых ГЭС,

освоение которых позволит полезно использовать гидроэнергетический потенциал в размере 5-8 млрд. кВт·ч в год.

Таким образом, строительство новых и восстановление законсервированных малых ГЭС, число которых к настоящему времени в КР составляют 39 штук общей мощностью 23 МВт является тем резервом, которое улучшит условия энергонеависимости Кыргызстана.

Обзор типовой структурной схемы системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора

Наряду со строительством новых малых ГЭС, в которых будут использованы новейшие технологии строительства ГЭС, не до конца решенными остаются вопросы модернизации расконсервированных малых ГЭС. Например, возбудитель УВГ-315/120Т, установленный по программе модернизации систем автоматического регулирования возбуждением (АРВ) на ГЭС-1 Аламединского каскада, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1, не до конца удовлетворяет эффективному управлению МГЭС.

В этой схеме указан тиристорный возбудитель, собранный по нулевой схеме и подключенный ко вторичной обмотке трансформатора Т1. Тиристорный возбудитель с номинальной мощностью, составляющей $P_{ном} = 38$ кВт при номинальном токе возбуждения 315А и номинальном напряжении возбуждения 120 В, обеспечивает питание обмотке возбуждения гидрогенератора мощностью 1.4 МВА.

На основании сказанного выше, целью настоящей статьи является показать характерные недостатки тиристорного преобразователя, не позволяющего более эффективно использовать выбранную схему возбудителя, которую установили взамен генератора постоянного тока, недостатки которого общеизвестны [3]. Для этого необходимо детально рассмотреть по-отдельности силовую часть схемы на рисунке 1 и систему управления возбудителем. Обозначить выявленные недостатки, сформулировать предложения для устранения их и дать рекомендации, с помощью которых можно увеличить эффективность производства электрической энергии гидроэлектрической станцией.

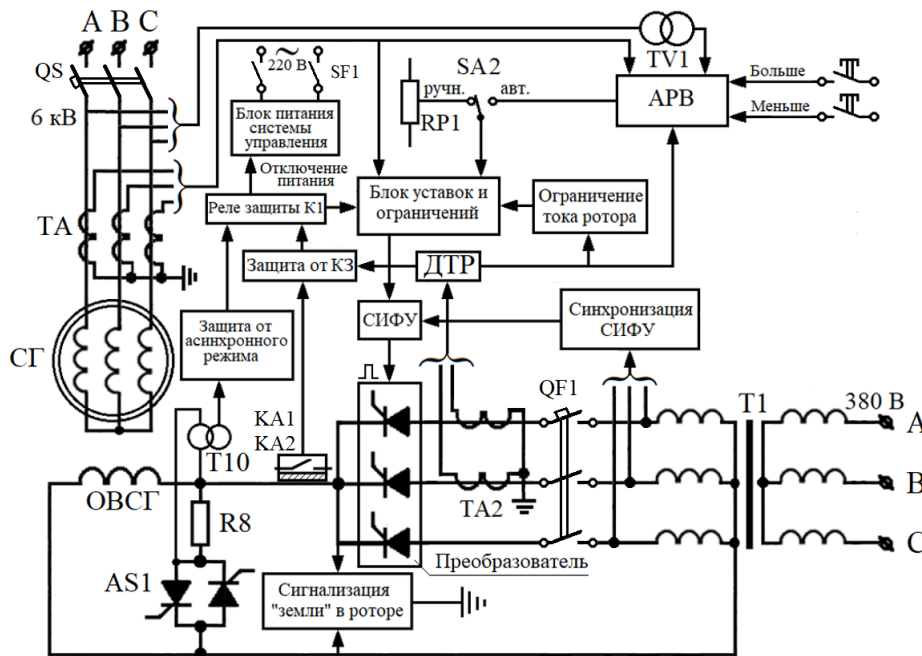


Рис. 1. Принципиальная схема устройства возбуждения синхронного генератора

В системе управления возбудителем подлежит рассмотрению структура построения системы импульсно-фазового управления (СИФУ) ТП, с помощью которой формируются импульсы управления силовыми вентилями ТП, а также блок АРВ, на основе которого автоматизируется процесс производства электроэнергии малой ГЭС. Остальные блоки на рисунке 1 обеспечивают защиту от нештатных режимов работы СГ, от быстрого действия которых зависит целостность оборудования малой ГЭС.

В основе построения блока АРВ лежит принцип токового компаундирования, за счет которого обеспечивается режим автоматического регулирования напряжения СГ как в статическом режиме, так и в аварийных режимах, когда за счет быстрого гашения поля в магнитной системе СГ сохраняется в рабочем состоянии основное электрооборудование МГЭС.

Принцип токового компаундирования можно достичь двумя способами: введением дополнительного напряжения компаундирования U_k в цепь обмотки возбуждения СГ от постороннего источника, как в возбудителе с генератором постоянного тока, так и обеспечением запаса по напряжению в схеме возбудителя с тиристорным преобразователем.

Оценим запас по напряжению, достигаемого тиристорным возбудителем, собранного по нулевой схеме. Для этого следует предварительно вычислить наибольшее средневывпрямленное значение напряжения на зажимах ТП за один период, определяемое по упрощенной формуле [4]:

$$U_d = \frac{m}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = U_{do} \cos \alpha, \quad (1)$$

где m – число фаз в цепи переменного тока; π – аргумент синусоидальной функции равное 180° эл. градусам; $U_{2m} = 289$ В – амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора Т1; α – угол запаздывания открытия вентиля.

Если отсчет импульса управления в СИФУ принять $\alpha = 0$, т.е. точка естественного зажигания вентилей, то можно определить наибольшее значение выпрямленного напряжения ТП, обозначенное как U_{do} :

$$U_{do} = U_{2m} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2)$$

Если в уравнениях (1) и (2) подставить $m = 3$, а фазное напряжение сети принять равным $U_2 = 206$ В, то расчетное значение наибольшего выпрямленного напряжения для нулевой схемы выпрямления при $\alpha = 0$ составит:

$$U_{do} = 0,83 \cdot U_{2m} = 1,17 \cdot U_2 = 1,17 \cdot 206 = 241 \text{ В}. \quad (3)$$

Полученное наибольшее значение выпрямленного напряжения ТП по (3) показывает на двухкратное превышение выходного напряжения от номинального. Максимальное напряжение, вычисленное по (3), может обеспечить коэффициент форсировки не более $k_f = 2$, чего недостаточно для быстрого гашения поля ротора в аварийных режимах работы СГ. Поэтому этот показатель относится к первому недостатку в принятой за основу схемы на рисунке 1.

Мощность трансформатора для нулевой схемы выпрямления ТП при номинальном токе обмотки возбуждения СГ равном $I_d = I_{ном} = 315$ А можно вычислить по следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= I_d / \sqrt{3} = 0,58 \cdot I_d = 0,58 \cdot 315 = 183 \text{ А}; \\ P_T &= 1,48 \cdot P_d = 1,48 \cdot P_d = 1,48 \cdot 76 = 112 \text{ кВт}; \\ P_d &= U_{do} \cdot I_d = 241 \cdot 315 = 76 \text{ кВт}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из соотношения (4) видно, что установленная мощность трансформатора выше установленной мощности нагрузки на 50%, виной которой является протекание постоянной составляющей тока нагрузки по вторичной обмотке трансформатора.

Из теории электрических машин известно, что явление вынужденного намагничивания сердечников трансформаторов при протекании постоянной составляющей тока приводит к тому, что потери в магнитопроводе увеличиваются, амплитуда токов во вторичной цепи возрастает, форма тока искажается [5]. Для уменьшения влияния постоянной составляющей тока нагрузки на насыщение магнитопровода приходится увеличивать сечение сердечника трансформатора. Увеличение сечения сердечника трансформатора автоматически приводит к завышению мощности трансформатора, поэтому этот фактор относится ко второму недостатку принятой за основу схемы на рисунке 1.

Тиристорный преобразователь (ТП, рис. 1) содержит три силовых тиристора, поэтому СИФУ должен содержать три идентичных канала, формирующих управляющие импульсы для этих тиристоров. На рисунке 2 показана функциональная схема одного из каналов СИФУ, построенная по классической структуре, реализующая вертикальный принцип управлений ТП [6]. В этой работе выделим те недостатки в структуре СИФУ, взяв за основу недостаточную подготовленность об-

служивающего персонала, т.е. на отсутствие опыта для корректировки и поднастройки узлов в элементах СИФУ, показанных на рисунке 2.

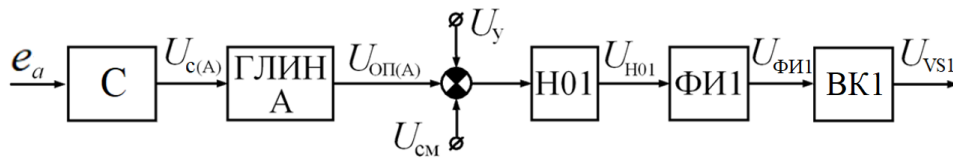


Рис. 2. Функциональная схема СИФУ для управления тиристором, подключенным к фазе А

На рисунке 3 приведены осциллограммы контрольных точек, позволяющие проанализировать и выявить те недостатки, на которые необходимо обратить внимание в процессе модернизации системы АРВ, приведенной на рисунке 1.

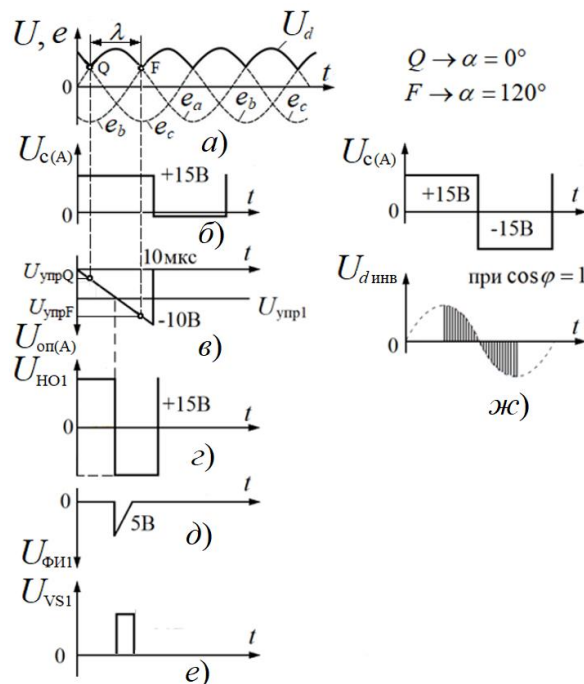


Рис. 3. Диаграмма напряжений, поясняющие принцип формирования управляющих импульсов по каналу VS1

Графики на рисунке 3-а показывают кривую выпрямленного напряжения U_d , подаваемого на обмотку возбуждения (ОВ) СГ, полученную при угле запаздывания $\alpha = 0$, т.е. при подаче управляющих импульсов в точку естественного открывания силовых вентилях. В кривой выходного напряжения $U_d = f(t)$ эта точка обозначена буквой Q. Согласно вертикальному принципу управления этой точке соответствует напряжение управления, соответствующее $U_{упрQ}$ (рис. 3-в), являющийся максимальным и критичным, так как дальнейшее увеличение его приведет к срыву управляемости ТП.

Регулирование напряжения ОВСГ производится изменением напряжения управления в пределах $U_{упрQ} < U_{упр} < U_{упрF}$. В этих пределах изменения напряжения управления СИФУ обеспечивает работу ТП в выпрямительном режиме в интервале, отмеченном на рисунке 3-а греческой буквой λ . Однако, управляемость ТП не ограничивается интервалом λ , так как непрерывное генерирование управляющих импульсов СИФУ расширяет работу ТП до интервала $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 150^\circ$. При этом интервал $\Delta\lambda = 30^\circ$ частично относится и к инверторному режиму, когда под действием накопленной на индуктивности ОВСГ электромагнитной энергии ток, изменив свое направление, инвертирует эту энергию в сеть.

Напряжение на зажимах ОВСГ в режиме инвертирования энергии в сеть ТП иллюстрируется графиками на рисунке 3-ж. Обычно это явление наблюдается в переходных процессах или в аварийных режимах работы СГ, когда система АРВ, переводя ТП в инверторный режим работы, обеспечивает быстрое гашение поля в магнитной системе СГ [7].

Элемент С в функциональной схеме (рис. 2) формирует прямоугольные импульсы, приведенные на рисунке 3-б. Для этого на вход синхронизатора С подается пониженное напряжение синхронизации e_a , а на выходе его образуется прямоугольный импульс, с помощью которого формируется опорное пилообразное напряжение (длительность соответствует фазе в 180°).

Диаграммы напряжений на рисунке 3-в – 3-е поясняют принцип действия других элементов СИФУ: нуля органа НО1, на входе которого сравниваются напряжения $U_{упр}$ и $U_{оп(А)}$ и при их равенстве на выходе НО1 формируется напряжение $U_{НО1}$ (рис. 3-в); формирователя импульсов ФИ1, представляющего собой дифференциальную электрическую цепь, основное назначение которой в формировании импульса требуемой длительности (рис. 3-г); напряжения выходного каскада ВК1 СИФУ, основное назначение которого в формировании импульса требуемой мощности (рис. 3-е).

В модернизируемом варианте тиристорного возбудителя СТ в структуре СИФУ, требующей пересмотра, является блок синхронизации, так как возникает необходимость генерирования опорного напряжения $U_{оп}$, отсчитываемого от точки естественного открытия вентилей и ограничения длительности опорного напряжения (по фазе до 150°).

Для регулирования напряжения возбудителя в блоке АРВ (рис. 1) предусмотрен регулятор напряжения (РН), имеющий структуру пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) звена, с помощью которого обеспечивается режим автоматического регулирования напряжением генератора. Из курса «Теория электропривода» известно, что наличие дифференциальной составляющей в прямом канале управления снижает помехозащищенность системы в целом, поэтому при проектировании систем управления объектом стремятся отходить от дифференциальной составляющей регуляторов [8].

Кроме этого, в составе АРВ присутствуют цепи защиты от нештатных режимов работы тиристорного возбудителя, организованные с помощью датчиков, реле и контакторов, наличие которых уменьшает быстродействие системы в аварийных режимах.

Таким образом, можно обозначить основные недостатки в системе управления возбудителем, к которым относится наличие множества потенциометров, специально предусмотренных для задания уставок, ограничений и других параметров, что требует определенной подготовленности обслуживающего персонала для его глубокого понимания процесса настроек в повседневном обслуживании возбудителя. Кроме этого, при возникновении нештатных режимов работы в объекте управления, к которым, в первую очередь, относятся аварийные режимы СТ, реакцией цепей защиты на эти режимы является последовательное включение герконных реле, реле защит и контакторов, что суммарно увеличивает время срабатывания защиты.

Разработка принципиальной схемы системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора

На рисунке 4 приведена принципиальная схема модернизируемого устройства возбуждения СТ, в которой устранены отмеченные выше недостатки при внесении незначительных изменений в силовую часть тиристорного преобразователя.

В этой схеме выбор мостовой схемы тиристорного возбудителя позволил увеличить коэффициент форсировки $k_f = 4$, за счет включения последовательно к имеющейся группе тиристоров еще одной группы силовых вентилей, объединённых между собой анодами. На рисунке 4 эта группа обозначена символами VS2, VS4, VS6, а обмотка возбуждения подключена между этой группой тиристоров и катодной группой тиристоров из VS1, VS3, VS5.

Так как, мостовая схема выпрямления образована последовательным соединением двух тиристорных групп вентилей, то их можно рассматривать как две нулевые схемы, работающие в оба полупериода переменного напряжения. Поэтому для мостовой схемы справедливы следующие соотношения [4]:

$$\left. \begin{aligned} U_{d0} &= 2(1,17U_2) = 2,34U_2 = 1,35U_{2л}; \\ I_2 &= 2 \cdot 0,58I_d = 1,16I_d; \\ P_r &= 1,05P_d, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $U_{2л} = \sqrt{3}U_2$ – линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Первое уравнение (5) указывает на двухкратное увеличение выходного напряжения, а третье выражение подтверждает то, что установленная мощность трансформатора в мостовой схеме незначительно превышает установленную мощность нагрузки.

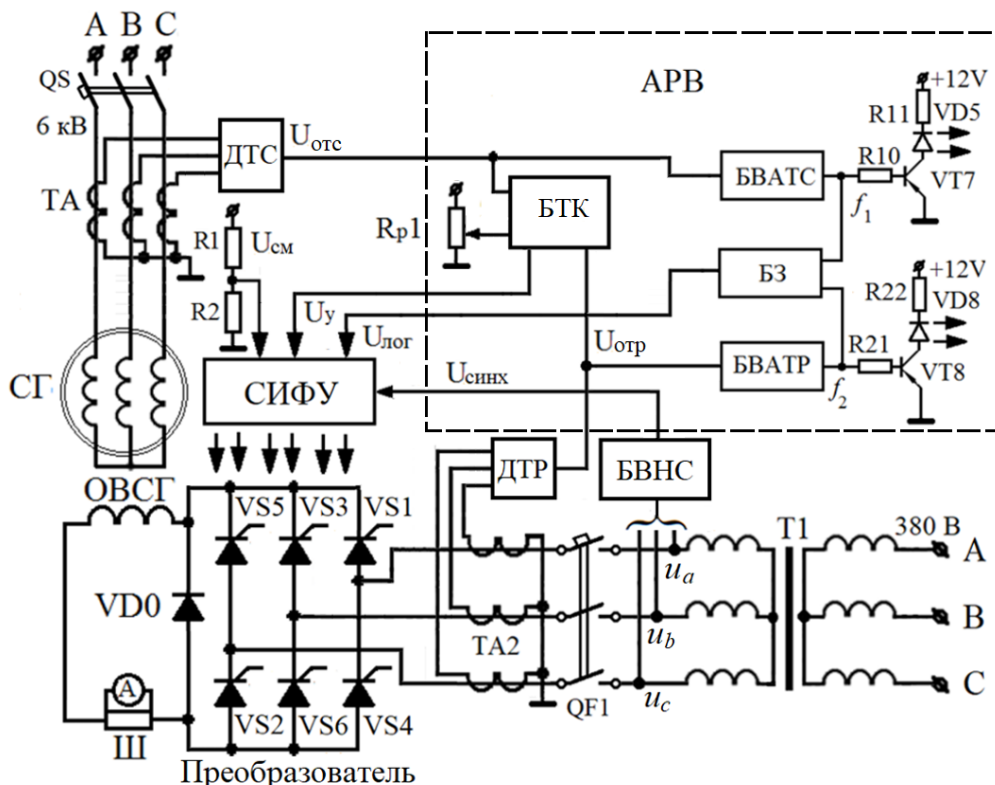


Рис. 4. Принципиальная схема модернизированного устройства возбуждения синхронного генератора

Отмеченные выше недостатки системы управления возбудителем невозможно устранить сохранением прежней структуры АРВ. В частности, рассмотренный в работе [3] принцип токового компаундирования при коэффициенте форсировки $k_f = 4$, достигаемый мостовой схемой выпрямления, может быть полностью адаптирован в блок АРВ и внесением двухконтурной системы регулирования тока статора: внутренний контур с регулятором тока ротора и внешний контур с регулятором тока статора. Для этого требуется ввести некоторые изменения в алгоритм синтеза этих регуляторов и применить известные методы настройки для оптимизации процессов как в статическом, так и в динамическом режимах работы возбудителя.

Система управления возбудителем существенно упростится, если в структуру АРВ ввести вычислительные блоки, которые в схеме на рисунке 4 указаны как: БВНС – блок вычисления синхронизирующих напряжений; БВАТР, БВАТС – блоки вычисления аварийных токов, соответственно ротора и статора; БЗ – блок вычисления логического напряжения $U_{лог}$, блокирующего СИФУ на выдачу управляющих импульсов силовым вентилям, что равносильно отключению тиристорного возбудителя от сети [7].

Алгоритм вычисления блоком БВНС поясняется диаграммами напряжений, приведенных на рисунке 5, которые позволяют разработать программу вычисления синхронизирующих прямоугольных напряжений $U_{с(А)}$ и $U_{с(-А)}$, задающих интервал формирования управляющих импульсов для тиристоров VS1 в катодной группе и VS4 в анодной группе вентиляей.

Синхронизирующее напряжение $U_{с(А)}$, отсчитываемое от точки естественного отпирания для тиристора VS1 длительностью $\lambda = 150$ электрических градусов, получается в результате вычитания положительных полуволн синусоид $u_a - u_c$ (рис. 5-б), и выделения прямоугольного импульса на выходе компаратора (рис. 5-в) $U_{с(А)}$. По аналогичному алгоритму получено синхронизирующее напряжение $U_{с(-А)}$, представленное диаграммой на рисунке 5-д, которое получено после прохождения через компаратор разницы напряжений $[-u_a - (-u_c)]$, показанной на рисунке 5-г.

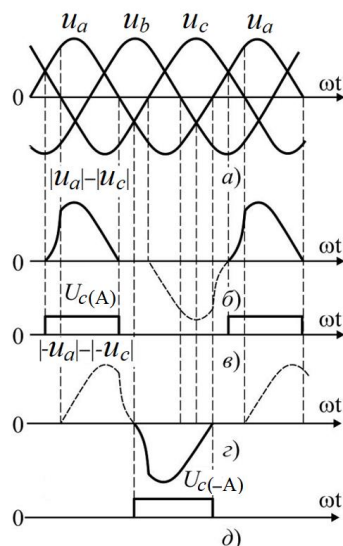


Рис. 5. Диаграммы, поясняющие принцип формирования напряжений синхронизации для вентилях VS1 и VS4

Блоки БВАТР и БВАТС построены по единому алгоритму, основанному на измерении пульсов тока нагрузки, например, тока ротора I_d , протекающего при возникновении аварийного режима по вторичной обмотке трансформатора Т1, измеренного с помощью датчика ДТР, как показано на рисунке 6. По аналогичному алгоритму построена структура БВАТС, если измерение импульсов тока статора производится с помощью датчика ДТС, протекающего к нагрузке по статорным обмоткам СГ. Импульсы токов ротора I_d сравниваются на входе компаратора с опорным напряжением $U_{оп}$, устанавливающим границу допустимого тока ротора. Превышения импульсов токов могут быть единичными в результате действия возмущений со стороны нагрузки и непрерывными в аварийных режимах.

На рисунке 6 приведены осциллограммы, поясняющие принцип идентификации этих импульсов токов в блоке БВАТР в аварийном режиме, когда интегратор в составе вычислительных блоков, имеющий переменную структуру, позволяющий изменять постоянную интегрирования, формирует сигналы f_2 (рис. 4). Алгоритм формирования сигнала f_2 следующий. Если импульс тока I_d превышает $U_{оп}$, то на выходе компаратора появляется прямоугольное напряжение U_k , воздействующее на интегратор, который начинает интегрировать $U_{и}$ с постоянной времени $T_{и1}$ в течение действия импульса тока. При отсутствии импульса тока интегратор стремится к исходному состоянию, интегрируя в обратном направлении с постоянной $T_{и2}$ меньшей $T_{и1}$.

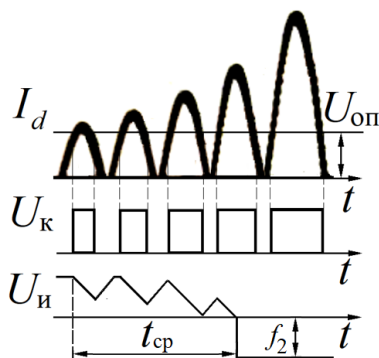


Рис. 6. Диаграммы, поясняющие принцип действия БВАТС и БВАТР

В аварийном режиме череда импульсов тока не более 4-х позволяет интегратору сформировать на выходах блоков БВАТР сигнал f_2 , который соответствует времени срабатывания защиты, равному $t_{ср} = 15$ мс, как показано на рисунке 6. Вычислительный элемент в составе блока защиты БЗ отреагирует на сигнал f_2 , сформировав напряжение $U_{лог}$, блокирующего подачу управляющих импульсов вентилям тиристорного возбуждателя.

Основное достоинство применения блоков БВАТР, БВАТС и БЗ заключается в том, что в аварийных режимах ускоряется процесс гашения поля СГ и отключается возбудитель от сети в течение короткого времени (не превышающего 20 мс).

Заключение

Результатами данной работы являются выявленные недостатки силовой части в системе управления устройством возбуждения генератора УВГ-315/120Т, установленного по программе модернизации систем автоматического регулирования возбуждением (АРВ) на ГЭС-1 Аламединского каскада. К недостаткам силовой части возбудителя относится то, что тиристорный преобразователь собран по нулевой схеме. Известно, что нулевая схема может обеспечить только двухкратный запас по напряжению для обмотки возбуждения синхронного генератора. Этот недостаток не позволяет в полной мере использовать принцип токового компаундирования в процессе регулирования тока ротора СГ. Кроме того, специфика работы нулевой схемы ТП завышает мощность трансформатора на 50%, что отрицательно влияет на энергетические показатели силового электрооборудования возбудителя.

Переход к мостовой схеме выпрямления ТП возбудителя, выполненной авторами и представленной как альтернативная система возбуждения МГЭС, позволила устранить эти недостатки при незначительных изменениях, внесенных в силовую часть схемы тиристорного преобразователя. Однако структура системы управления автоматического регулирования напряжением синхронного генератора существенно претерпела изменение, в первую очередь, введением блоков вычисления как в СИФУ тиристорного преобразователя, так и в блоках компаундирования и блока АРВ. Наличие блоков вычисления аварийных токов статора и ротора существенно снизило время реакции на процесс гашения поля синхронного генератора, чем увеличивается эффективность сохранения длительной работоспособности всей системы автоматического регулирования возбуждением.

Введение блока токового компаундирования в структуру АРВ позволило применить принцип прямого регулирования тока ротора за счет двухконтурной системы регулирования тока статора в соответствии с заданным статизмом внешней характеристики СГ. Эта структура заметно улучшила надежность работы в модернизируемой системе АРВ, когда в прямом канале системы управления возбудителем исключена дифференциальная составляющая регулирования напряжения, недостатки которой оказывает заметное влияние на устойчивость работы системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальная электрическая сеть Кыргызстана [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.nesk.kg/ru/ (дата обращения 15.07.2019).
2. Строительство и реконструкция генерирующих мощностей [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.invest.kg/ru/ (дата обращения 15.07.2019).
3. Кадыров И.Ш., Карасева Н.С., Андарбеков Ж.А., Бактыбек уулу Азамат. Модернизация системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора малой гидроэлектростанции с целью безопасной эксплуатации гидроагрегата // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Т. 4, № 1. С. 197-205.
4. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода. М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1987. 224 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Изд-во Энергия, 1978. 832 с.
6. Кадыров И.Ш. Принципы, методы и алгоритмы построения микропроцессорных систем управления электромеханическими машинными агрегатами. Бишкек: КГТУ им. И. Раззакова. Изд-й центр Текник, 2007. 206 с.
7. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1980. 424 с.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1985. 560 с.

Кадыров Ишенбек Шакирович

Д-р техн. наук, профессор каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 772 32-79-48
Эл. почта: bgtu_kg@mail.ru

Турусбеков Бактыбек Сагындыкович

Д-р техн. наук, проф. каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 555 640 990
Эл. почта: tbs200618@gmail.com

Жаныбекова Бермет Жаныбековна

Ст. преп. каф. «Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 701 939 323
Эл. почта: ber-jan90@mail.ru

Нарымбетов Максат Сагыналиевич

Канд. техн. наук, заведующий каф. «Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет им.
К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек,
ул. Медерова, 68
Тел.: (+996) 705 09-22-13
Эл. почта: maks_875@mail.ru

Кемелова Сабира Кемеловна

Ст. преп. каф. «Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 551 03-64-26
Эл. почта: Kemelovasabira@gmail.com

*I.Sh. KADYROV, B.S. TURUSBKOV,
B.Zh. ZHANYBEKOVA, M.S. NARYMBETOV, S.K. KEMELOVA*

**OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE AUTOMATIC CONTROL
SYSTEM BY EXCITATION OF A SYNCHRONOUS GENERATOR OF
SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS**

The materials of this article provide a detailed analysis of the automatic excitation control system with a thyristor exciter of a synchronous generator, installed under the modernization program at one of the small hydroelectric power plants (MPPS) of the Alameda cascade instead of an electric motor exciter. As a result of the analysis, the identified shortcomings in the control system, in the power part of the thyristor exciter, as well as in the automatic excitation control system (ARV). Proposals have been formulated to eliminate them and recommendations have been given with which it is possible to increase the efficiency of electric energy production by a hydroelectric power plant. In particular, the following blocks have been introduced into the exciter control system: to calculate the algorithm for generating synchronizing voltages in the SIFU TP; to calculate the emergency currents of the stator and rotor; to calculate the logical voltage blocking the output of control pulses to power valves in the event of abnormal operating modes of the synchronous generator. The computing units in the proposed ARV system ensure the safe operation of the electrical equipment of the synchronous generator. An ARV system is proposed, which includes a current compounding unit (BTK) with a dual-circuit SG stator current control system: internal to regulate the rotor current, external to regulate the stator current in accordance with a given staticism of the external characteristic of the SG. The introduction of the BTK block with a dual-circuit SG stator current control system into the ARV system made it possible to eliminate the differential component in the structure of the voltage regulator in the old system, which significantly increased the stability margin of the entire automatic control system by excitation of the synchronous generator.

Keywords: automatic system, field blanking, hydropower installation, dynamic mode, machine exciter, voltage regulator, self-excitation, static mode, boost level, current compounding, thyristor exciter.

REFERENCES

1. National Electric Network of Kyrgyzstan [Electronic resource]. Access mode: www.nesk.kg/ru/ (accessed July 15, 2019) (in Russian).
2. Construction and reconstruction of generating capacities [Electronic resource]. Access mode: www.invest.kg/ru/ (accessed July 15, 2019) (in Russian).
3. Kadyrov I.Sh., Karaeva N.S., Andarbekov Zh.A., Baktybek uulu Azamat Modernization of the automatic control system for excitation of a synchronous generator of a small hydroelectric power plant for the purpose of safe operation of the hydroelectric unit. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2020. Vol. 4, No. 1. P. 197-205 (in Russian).
4. Terekov V.M. Elements of an automated electric drive. Moscow. Publisher «Energoatomizdat» 1987. 224 p. (in Russian).
5. Waldeck A.I. Electric Machines Energy. Moscow. Publisher «Energy». 1978. 832 p. (in Russian).
6. Kadyrov I.Sh. Principles, methods and algorithms of construction of microprocessor control systems of Electromechanical machine units. Bishkek. KGTU named after I. Razzakov. Publisher «Teknik». 2007. 206 p. (in Russian)
7. Rudenko V.S., Cenko V.I., Chizhenko I.M. Fundamentals of transformative technology. Moscow. Publisher «Higher School». 1980. 424 p. (in Russian)
8. Klychev V.I. Theory of electric drive. Moscow. Publisher «Energoatomizdat». 1985. 560 p. (in Russian).

Ishenbek Sh. Kadyrov.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department «Electrification and
automation of agriculture»,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
68, st. Mederov, Bishkek, 720005, Kyrgyzstan,
Phone: (+996) 772 32-79-48
E-mail: bgtu_kg@mail.ru

Bermet Zh. Zhanybekova

Art. teacher Department «Electrification and
automation of agriculture»,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
68, st. Mederov, Bishkek, 720005, Kyrgyzstan,
Phone: (+996) 701 939 323
E-mail: ber-jan90@mail.ru

S.K. Kemelova

Art. teacher Department «Electrification and automation of
agriculture», Skryabin Kyrgyz National Agrarian Universi-
ty, 720005, Kyrgyzstan, Bishkek, st. Mederov, 68
Phone: (+996) 551 03-64-26
E-mail: Kemelovasabira@gmail.com

Baktybek S. Turusbekov.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.
Department «Applied Mechanics, Physics and engineering
pedagogy»,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
68, st. Mederov, Bishkek, 720005, Kyrgyzstan,
Phone: (+996) 555 640 990
E-mail: tbs200618@gmail.com

M.S. Narymbetov

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of
Electrification and Automation of Agriculture,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
720005, Kyrgyzstan, Bishkek, st. Mederov, 68
Phone: (+996) 705 09-22-13
E-mail: maks_875@mail.ru

УДК 626:621.31:621.3

И.Ш. КАДЫРОВ, Б.С. ТУРУСБЕКОВ, Б.Ж. ЖАНЫБЕКОВА,
М.С. НАРЫМБЕТОВ, С.К. КЕМЕЛОВА

МЕТОДЫ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ ТОКОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В статье раскрыта возрастающая роль улучшения энергетической ситуации северных районов Кыргызстана, где сосредоточены основные потребители электрической энергии. На примере показателей гидроэнергетического потенциала горных рек этого региона, показана роль увеличения доли малых гидроэлектростанций (МГЭС) в производстве электрической энергии в энергетическом секторе республики. В результате сравнения существующей системы автоматического регулирования возбуждением на одной из МГЭС, взятой за типовую, а также модернизируемой системы, представленной как альтернативная, раскрыты проблемные вопросы, которые в данной работе предстояло решать. На основании анализа существующей системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронного генератора выявлены их недостатки и определены пути решения для устранения. Для достижения поставленной цели в модернизируемой системе внесены изменения в силовой части возбудителя синхронного генератора, в структуре управления тиристорным возбудителем, а также в структуре построения системы АРВ. В отличие от типовой в модернизируемой системе АРВ вместо регулятора напряжения введена двухконтурная система регулирования токов статора и ротора СГ.

Переход к двухконтурной системе регулирования токов синхронного генератора позволил провести синтез регуляторов токов СГ с применением простейших методов, которые хорошо зарекомендовали в системах автоматического управления электроприводами постоянного тока. Скорректированы основные функции, которые возлагаются блоку токового компаундирования (БТК) в системе автоматического регулирования возбуждением как в статических, так и в динамических режимах, связанных с пуском и остановкой генератора, наброса и сброса нагрузки СГ. Введение в структуру БТК вычислительных устройств для расчета токов статора и ротора улучшили защитные меры и обеспечили надежность эксплуатации гидроагрегата. Приведенная методика синтеза регуляторов токов синхронного генератора позволила улучшить показатели модернизируемой системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора в статическом и динамическом режимах, позволила повысить эффективность эксплуатации электрооборудования гидроагрегата.

Ключевые слова автоматическая система, регулирование возбуждения, синхронный генератор, гашение поля, статический режим, динамический режим, тиристорный возбудитель, регулятор напряжения, коэффициент форсировки, токовое компаундирование, синтез регулятора.

Введение

До 90 % территории Кыргызстана составляет горные местности, поэтому основной гидроэнергетический потенциал сосредоточен в 252 крупных и средних реках. Согласно приближенной оценки в этих реках можно извлечь электрической энергии в 18.5 млн. кВт мощности, которая составляет более 140-160 млрд. кВт·ч электроэнергии. Потенциальная энергия этих рек сосредоточена на естественном уклоне горных рек, изменяющимся в пределах от 5 до 20 м на 1 км длины. Эти энергетические ресурсы являются перспективой для строительства мощных и малых гидроэлектростанций (МГЭС) со средней удельной мощностью, составляющей 2227÷5322 кВт/км [1].

Для улучшения энергетической обеспеченности страны правительством принимаются меры по привлечению инвестиций на строительство новых МГЭС, за счет которых статистические данные в производстве электрической энергии в энергетическом секторе республики будут превышать нынешний уровень, составляющий лишь 1%.

Ситуацию по производству электрической энергии для северных районов страны, где сосредоточено значительное количество потребителей, можно улучшить не только строительством малых ГЭС, оснащенных современным электрооборудованием, но и модернизацией системы автоматического регулирования возбуждением (АРВ) на действующих электростанциях [2].

В настоящее время производство электроэнергии в Чуйской области Кыргызстана сосредоточено в небольших реках за счет построенных в прошлом столетии нескольких МГЭС, которые объединены в генерирующие предприятия ОАО «Чакан ГЭС». Материалы данной работы были получены в результате внедрения системы АРВ, произведенного по заказу предприятия ОАО «Чакан ГЭС», которую авторы предлагают, как альтернативную систему для модернизации оставшихся МГЭС, построенных еще в прошлом столетии.

Таким образом, цель данной работы заключается в выделении основных положений, внедренной системы АРВ, формулированию рекомендаций, которые с точки зрения авторов могут

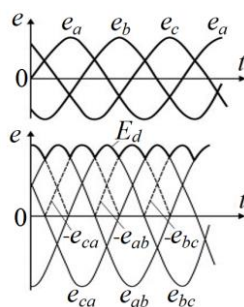


Рис. 2. Графики напряжений, поясняющие двухкратное увеличение выходного напряжения ТП

Отличительной особенностью организации системы управления мостовой схемой от нулевой заключается в том, что согласно графиков напряжений (рис. 2) ток может протекать через ОВСГ при условии, если в силовой схеме ТП открыты одновременно как минимум два тиристора – один в катодной, другой в анодной группе. Связано это с тем, что ОВСГ, являющаяся нагрузкой возбуждателя, подключена к линейному напряжению вторичной обмотки трансформатора Т1. Это положение существенно усложняет структуру системы импульсно-фазового управления (СИФУ) мостовой схемы ТП. Для правильности построения схемы СИФУ ТП необходимо рассмотреть очередность вступления в работу тириستоров анодной и катодной группы. Из рисунка 3 видно, что каждый вентиль ТП открыт в интервале 120° , а очередность вступления в работу силовых вентилей соответствует порядковому номеру тиристора, организуемая СИФУ для обеспечения непрерывности протекания тока через нагрузку.

Поясним эту особенность предположив, что в открытом состоянии находится тиристор VS1. Следующим, вступающим в работу, должен быть тиристор, обозначенный за номером VS2, включенный в соседнюю группу вентилей. Для открытия очередного по номеру тиристора СИФУ должна сформировать два импульса: свой (на рисунке 3 обозначен стрелкой сплошной линией) и подтверждающий импульс работающему тиристор (стрелка пунктирной линией) для того, чтобы цепь протекания тока через нагрузку не обрывалась. Кроме этого, как и в нулевой схеме, управляющие импульсы в многофазных тиристорных преобразователях должны отсчитываться от точки естественного отпирания вентилей [4].

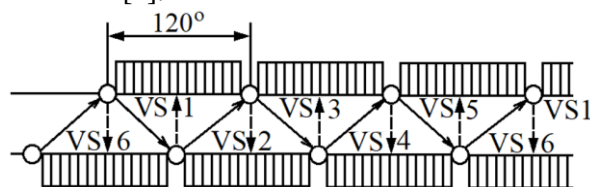


Рис. 3. Схема очередности включения вентилей

Точке естественного отпирания вентилей в трехфазной системе напряжений соответствует равенство мгновенных значений напряжений двух соседних фаз. Для определения точки естественного отпирания вентилей требуется предусмотреть вычислительное устройство в блоке синхронизации СИФУ, позволяющее вычислить эту точку, которая в последующем используется для запуска генератора линейно изменяющего напряжения (ГЛИН). При разработке сложного, многоэлементного СИФУ надежным инструментом является разработка математической модели каждого из элементов по алгоритмам, на основе которых можно определить структуру вычислительного устройства. Эти модели позволяют поэлементно уточнить тонкости настройки таких сложных систем как многоканальная СИФУ. При этом основное внимание необходимо уделять выделению входных и выходных переменных математической модели синхронизатора, которые бы совпадали с реальными переменными СИФУ.

Покажем этот способ реализации на примере блока синхронизации математической модели СИФУ, приведенной на рисунке 4, являющейся наиболее сложной с точки зрения математических вычислений над сигналами.

Метод математического моделирования синхронизатора шестиканальной СИФУ

Для установления структуры блока синхронизатора необходимо составить уравнения переменных этого устройства, желательно с постоянными коэффициентами и в реальном масштабе времени.

В математической модели блока синхронизатора, составленной с применением компьютерной математики MATLAB [5], реальный масштаб времени задают генераторы синусоидальных сигналов, обозначенные на рисунке 4 как «Sine Waive», «Sine Waive 1» и «Sine Waive 2». Эти генераторы генерируют синусоидальные напряжения с частотой 50 Гц со сдвигом в 120 электрических градусов, поэтому можно принять условие, что формирование управляющих импульсов силовых вентилях синхронизировано с сетью как в реальной системе.

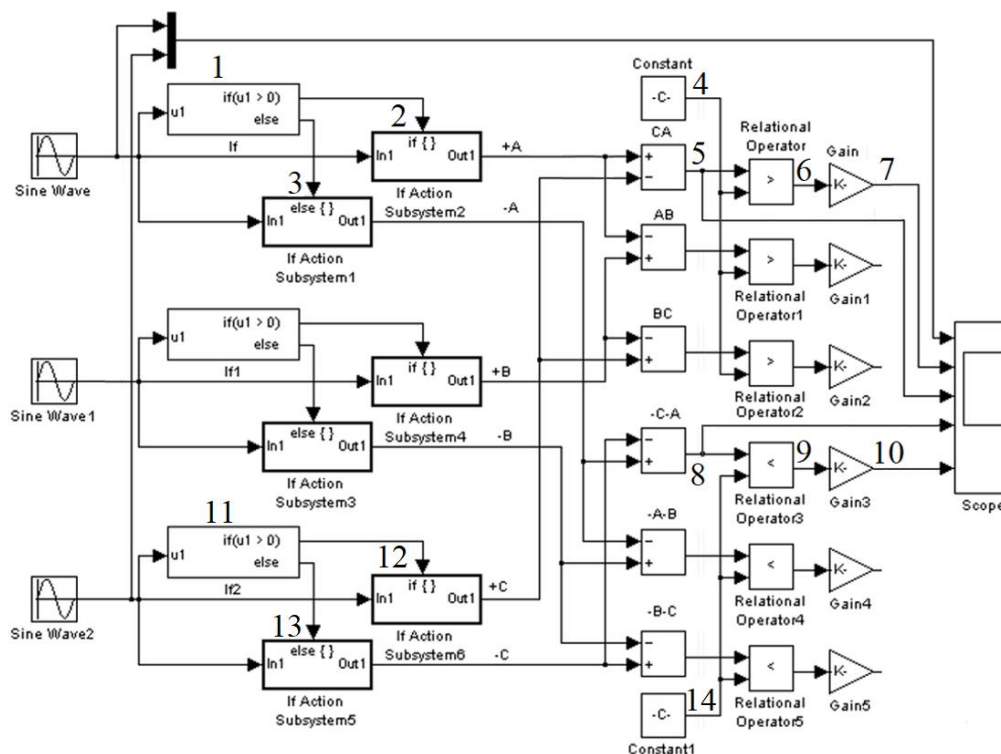


Рис. 4. Математическая модель синхронизатора шестиканальной СИФУ

Приведенные на рисунке 5 осциллограммы поясняют принцип формирования импульсов в математической модели СИФУ, содержащей 6 идентичных каналов.

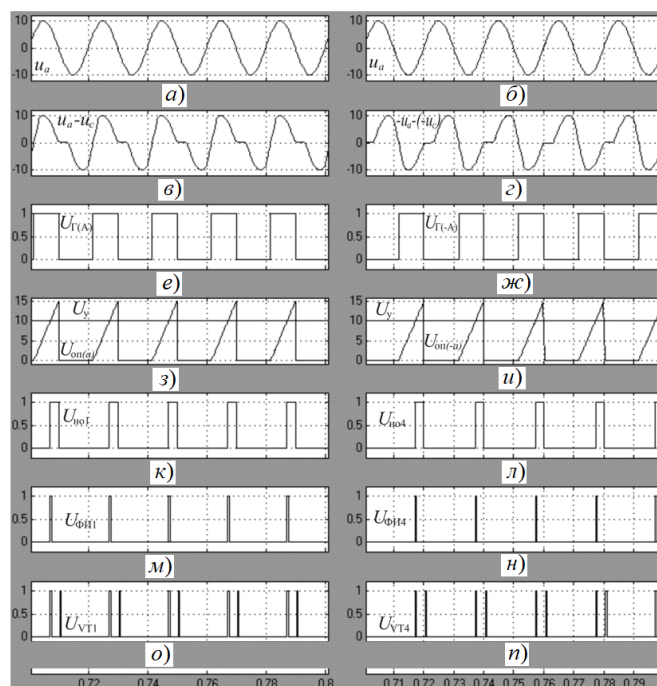


Рис. 5. Осциллограммы контрольных точек математической модели синхронизатора шестиканальной СИФУ

Рассмотрим более подробно набор элементов, участвующих в процессе формирования импульсов для открытия тиристора VS1, в катодной группе ТП (рис. 5-о) и тиристора VS4 в анодной группе ТП (рис. 5-п). Для этого напряжение синхронизации генератора «Sine Waive» (рис. 5-а) подается на элементы вычисления, обозначенные цифрами 1, 2, 3, а «Sine Waive 2» (рис. 5-б) подается на элементы вычисления, обозначенные цифрами 11, 12, 13. При этом элементы 1 и 11 выделяют модули положительных полуволн напряжений u_a и u_c и направляют на входы элементов 2, 12 отрицательные модули полуволн напряжений $-u_a$ и $-u_c$, далее направляют на входы элементов 3, 13. Вычитание из выходного напряжения элемента 2 выходное напряжение элемента 12 с помощью сумматора 5 позволяет получить напряжение $u_a - u_c$, приведенное на рисунке 5-в. Аналогичные математические действия элементов, обозначенные цифрами 3, 13 и 8 позволяют получить напряжение $-u_a - (-u_c)$, приведенное на рисунке 5-г. Полученные напряжения с выходов элементов 5 и 8 сравниваются на входе компараторов 6 и 9 с опорными напряжениями, обозначенными как «Constant». В результате сравнения на выходах элементов 4, 14 формируются выходные напряжения блока синхронизатора, обозначенные на рисунке 5-е и ж как $U_{Г(А)}$ и $U_{Г(-А)}$.

Остальные диаграммы на рисунке 5 показывают последовательность формирования напряжений на выходах элементов СИФУ, построенных по классической структуре, реализующие вертикальный принцип управления ТП.

На рисунке 5-з приведены осциллограммы напряжений математической модели нуля-органа, на входе которого сравниваются напряжения $U_{оп(А)}$ с выхода ГЛИН и напряжение управления U_y (рис. 5-з), от которого зависит значение угла запаздывания открывания α тиристора VS1. Результатом сравнения является напряжение на выходе нуля-органа $U_{но1}$ (рис. 5-к). Напряжение формирователя импульса $U_{фи1}$ (рис. 5-м) нормирует сигнал открывания вентиля по длительности, а напряжение U_{VT1} (рис. 5-о) получено на выходе распределителя импульса, формирующего свой и подтверждающий импульсы, объяснения которым даны при рассмотрении рисунка 3. Формирование управляющих импульсов для тиристора анодной группы VS4 производится по аналогичному алгоритму.

Для доказательства адекватности математической модели реальному объекту на рисунке 6 приведены осциллограммы одноименных контрольных точек.

В результате сравнения осциллограмм на рисунках 5 и 6 можно констатировать, что алгоритм, заложенный в математическую модель отдельных блоков, позволяет автоматически перенести в систему управления тиристорным преобразователем в виде конкретной схемы, чем облегчается процесс составления принципиальной электрической схемы СИФУ.

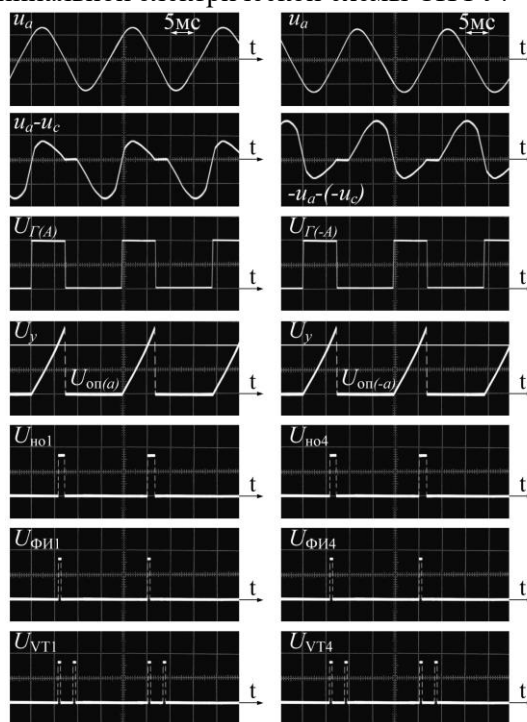


Рис. 6. Осциллограммы контрольных точек блоков СИФУ

Принцип действия (рис. 1) блоков вычисления аварийных токов статора (БВАТС) и ротора (БВАТР), а также блока защиты (БЗ) подробно изложены в работе [6]. Поэтому перейдем к рассмотрению методов синтеза регуляторов тока статора (РТС) и тока ротора (РТР), реализующие принцип токового компаундирования.

Методы синтеза регуляторов токов в системе автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора

Для синтеза регуляторов токов РТС и РТР в составе блока токового компаундирования (БТК) составлена принципиальная схема управления возбудителем, показанная на рисунке 7, в которой к силовым элементам системы АРВ относится обмотка возбуждения, подключенная к зажимам тиристорного возбудителя синхронного генератора. В этой схеме принцип токового компаундирования реализуется за счет регулятора РТР, включенного в контур регулирования тока обмотки ротора синхронного генератора. Критерием настройки регулятора РТР является ток статора $I_{ст}$, регулирование которого производится в соответствии с заданным статизмом внешней характеристики СГ.

Схема рисунка 7 представляет собой двухконтурную систему регулирования токов: к внешнему относится контур регулирования тока статора, а к внутреннему контур регулирования тока ротора. Для измерения токов предусмотрены датчик тока статора (ДТС) и ротора (ДТР), принципиальные схемы которых показаны на рисунке 1.

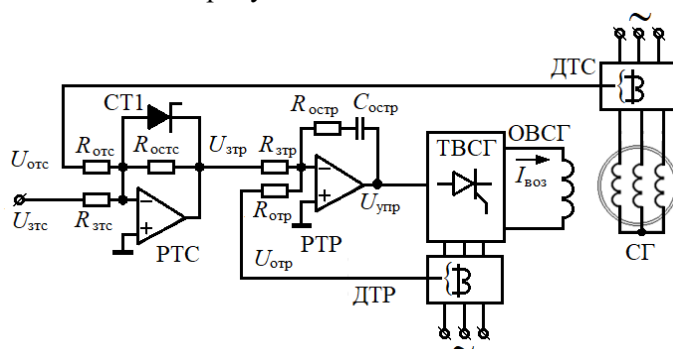


Рис. 7. Принципиальная схема АРВ, построенная на основе принципа токового компаундирования

Как было сказано выше, принцип токового компаундирования заложен во внутреннем контуре регулирования тока ротора, так как он решает задачу достижения заданного статизма внешней характеристики синхронного генератора и поддержания этого показателя во всем диапазоне изменения нагрузки в сети.

К достоинству выбранной схемы (рис. 7) относится возможность выбора известных методов синтеза регуляторов БТК, позволяющих простыми математическими вычислениями определить структуры регуляторов РТР и РТС. Например, для контура тока ротора можно применить метод последовательной коррекции, который хорошо зарекомендовал себя в автоматизированном электроприводе при формировании тока якоря двигателя постоянного тока во всех режимах его работы. Во внешнем контуре регулирования тока статора структура регулятора РТС будет определяться той задачей, на выполнение которой разрабатывается система АРВ, т.е. статического или астатического регулирования напряжения синхронного генератора [7].

Для синтеза регулятора тока ротора РТР применим метод последовательной коррекции, составив структурную схему, представленную на рисунке 8.

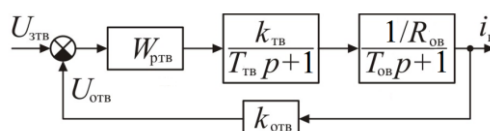


Рис. 8. Структурная схема цепи обмотки возбуждения СГ

В этой схеме тиристорный возбудитель, собранный по мостовой схеме, может быть представлен апериодическим звеном 1-го порядка. Этому способствует значительная индуктивность ОВСГ, вследствие чего в работе силовых вентилей отсутствуют режимы прерывистых токов. Эта особенность работы возбудителя позволяет линеаризовать характеристику тиристорного возбуди-

теля и записать его передаточную функцию аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом усиления $k_{\text{тв}}$ и постоянной времени $T_{\text{тв}}$. Нагрузкой тиристорного возбудителя является обмотка возбуждения СГ, которая на схеме рисунка 8 представлена инерционным звеном с коэффициентом передачи $1/R_{\text{ов}}$ и большой постоянной времени, равной $T_{\text{ов}} = 0,7$ с.

Для нахождения передаточной функции регулятора тока возбудителя (РТВ) требуется записать желаемую передаточную функцию разомкнутого контура тока $W_{\text{раз.т}}$ согласно методике, приведенной в [7]:

$$W_{\text{раз.т}} = \frac{1/k_{\text{от}}}{a_{\text{т}} T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}, \quad (1)$$

где $a_{\text{т}}$ – коэффициент, выбор значения которого в пределах $(1 \div 4)$ позволяет оптимизировать настройку контура тока; T_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени.

Передаточная функция (1) записана в виде желаемой с целью придания разомкнутому контуру регулирования тока возбуждения СГ статизма первого порядка, обеспечивающего высокое быстродействие за счет компенсации больших постоянных времени [7].

Передаточную функцию объекта регулирования можно записать на основании рисунка 8, приняв за малую некомпенсируемую постоянную времени в контуре регулирования тока $T_{\mu} = T_{\text{тв}} = 0,01$ с:

$$W_{\text{ор.т}} = \frac{k_{\text{тв}} (1/R_{\text{ов}})}{(T_{\mu} p + 1)(T_{\text{ов}} p + 1)}. \quad (2)$$

Передаточную функцию регулятора тока определим делением (1) на (2):

$$W_{\text{р.т}} = \frac{W_{\text{раз.т}}}{W_{\text{ор.т}}} = \frac{T_{\text{ов}} p + 1}{\frac{k_{\text{от}} k_{\text{тв}} a_{\text{т}} T_{\mu}}{R_{\text{ов}}} p} = \frac{T_{\text{ов}} p + 1}{T_{\text{и.т}} p}, \quad (3)$$

где $T_{\text{и.т}} = (k_{\text{от}} \cdot k_{\text{тв}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\mu}) / R_{\text{ов}}$ – постоянная интегральной составляющей РТР.

Выражение (3) показывает, что принципиальная схема регулятора тока, полученная в результате проведенного синтеза, приобретает схему интегрально-пропорционального (ИП) звена. Принципиальная схема ИП-регулятора, реализованная с помощью одного решающего операционного усилителя, показана на рисунке 7.

Передаточную функцию ИП-регулятора можно записать и по схеме рисунка 7 относительно элементов обвязки регулятора:

$$W_{\text{р.т}} = \frac{R_{\text{ос.т}} C_{\text{ос.т}} p + 1}{R_{\text{з.т}} C_{\text{ос.т}} p}. \quad (4)$$

На основании эквивалентности передаточных функций (3) и (4) получим расчетные соотношения, позволяющие производить настройку регулятора тока: $T_{\text{ов}} = R_{\text{ос.т}} \cdot C_{\text{ос.т}}$; $T_{\text{и.т}} = R_{\text{з.т}} \cdot C_{\text{ос.т}}$. На практике обычно задаются значением емкости $C_{\text{ос.т}}$, а значения сопротивлений $R_{\text{з.т}}$ и $R_{\text{ос.т}}$ определяются по известным $T_{\text{ов}}$ и $T_{\text{и.т}}$.

Оптимизация настройки контура регулирования тока ротора производится выбором коэффициента $a_{\text{т}} = 2$, что соответствует настройке контура тока на технический оптимум.

Синтез регулятора тока статора (РТС) синхронного генератора с применением метода последовательной коррекции осложняется тем, что получить однозначную зависимость между током статора и ротора не представляется возможным [8]. Поэтому, для определения структуры РТС и получения примерного способа настройки регулятора тока статора можно, если будет задан режим работы синхронного генератора: статический или астатический.

При выборе статического режима работы СГ используется пропорциональный регулятор тока, принципиальная схема которого приведена на рисунке 7. Принцип действия этого регулятора можно пояснить с помощью характеристики РТС, приведенной на рисунке 9. Эта характеристика дает полное представление о работе РТС, если системой АРВ задан статический способ управления работой СГ.

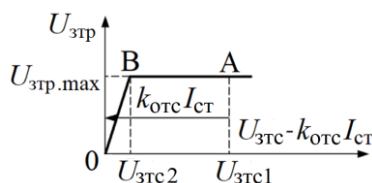


Рис. 9. Характеристика регулятора тока статора СГ

Отрезок характеристики, отмеченный буквами АВ задает максимальный ток компаундирования обмотке возбуждения СГ, равный допустимому максимальному току ротора, достигаемого выбором коэффициента форсировки при наличии запаса напряжения на зажимах тиристорного возбудителя. На рабочем участке характеристики (отрезок ОВ) $U_{зтр} < U_{зтр.max}$, поэтому на этом участке задание на ток ротора соответствуют статизму внешней характеристики СГ. Следовательно, настройка РТС заключается в выборе наклона рабочего участка характеристики РТС, определяемый статизмом внешней характеристикой СГ.

Если установлена связь между заданным статизмом и коэффициентом усиления $k_{ркс}$, который определяется отношением сопротивлений $R_{отс}$ к $R_{зтс}$, то можно считать, что АРВ задает РТС управление СГ в статическом режиме работы. При выборе АРВ астатического режима работы СГ принципиальная схема РТС примет вид ИП-звена, аналогично принципиальной схеме регулятора тока ротора, показанной на рисунке 7.

Приведенная на рисунке 10 осциллограмма переходного процесса тока возбуждения СГ позволяет оценить характер нарастания тока в обмотке возбуждения синхронного генератора, у которого постоянная времени обмотки возбуждения равно $T_{ов} = 0.7$ с.

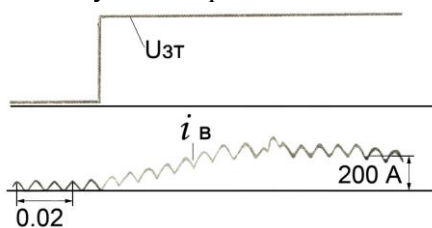


Рис. 10. Осциллограмма нарастания тока в цепи возбуждения при скачкообразном воздействии

Нарастание тока возбуждения до номинального установившегося значения при единичном толчке входного воздействия заканчивается в течение времени $t_n = 0.07$ с, с заданным перерегулированием соответствующей настройке контура тока на технический оптимум. При этом пропорциональная часть регулятора тока ротора обеспечивает форсировку возбудителя по напряжению, достигающего до четырех крат от номинального значения, которая сокращает время переходного процесса в 10 раз в сравнении с постоянной времени ОВСГ.

Эти показатели подтверждают правильность выбора структуры АРВ и выбранные методы настройки регуляторов тока ротора и статора [7, 9].

Заключение

Результатом данной работы являются показатели двух равнозначных систем автоматического регулирования возбуждением (АРВ) синхронного генератора малой ГЭС (МГЭС): устройства возбуждения генератора УВГ-315/120Т, который можно отнести к типовой и модернизированной системе АРВ, выполненной авторами как альтернативная. В типовом устройстве возбуждения СГ малой ГЭС установлен тиристорный преобразователь, собранный по нулевой схеме, недостатки которого общеизвестны. В модернизируемом варианте, выбрана мостовая схема возбудителя, которая позволила устранить выявленные недостатки в типовой, т.е. позволила уменьшить установленную мощность трансформатора и автоматически увеличить запас по напряжению обмотки возбуждения СГ для того, чтобы в полной мере использовать принцип токового компаундирования в системе АРВ.

Следует отметить, что структура системы импульсно-фазового управления (СИФУ), реализующая вертикальный принцип управления тиристорным возбудителем, собранным по мостовой схеме, существенно усложнилась, поэтому для ее реализации возникла необходимость применения метода программирования с использованием компьютерной математики МАТЛАБ. Преимуществом этого метода в процессе построения цифрового СИФУ является возможность автомати-

ческого переноса результатов моделирования на программное обеспечение ПЛК или микропроцессорной СИФУ.

Существенное изменение в структуре модернизированной системы АВР претерпела структура построения блока токового компаундирования (БТК). В модернизируемой системе АВР вместо регулятора напряжения, имеющего вид пропорциональной-интегральной-дифференциальной структуры, использована двухконтурная структура регулирования токов статора и ротора. Построение БТК по двухконтурной структуре позволило в полной мере использовать принцип токового компаундирования, а также применить известные методы синтеза и настройки регуляторов токов статора и ротора СГ.

Введение в систему БТК блоков вычисления аварийного тока статора и ротора привело к существенному упрощению структуры системы автоматического регулирования возбуждением СГ, возросла скорость реакции на выполнение необходимых функций защиты синхронного генератора в аварийных режимах.

Четырехкратная форсировка возбудителя по напряжению обеспечивает высокое быстродействие тиристорного возбудителя как в переходных процессах, так и в аварийных режимах работы СГ. Как показали снятые осциллограммы, нарастание и спадание тока происходит в течение $t_n=0.07$ с. Этот показатель в 10 раз ниже, чем постоянная времени обмотки возбуждения СГ, чем и подтверждается эффективность работы структуры внедренной системы АВР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малые ГЭС как альтернатива для Кыргызстана [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://knew.kg> (дата обращения 15.07.2019).
2. Строительство и реконструкция генерирующих мощностей [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.invest.kg/ru/ (дата обращения 15.07.2019).
3. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода. М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1987. 224 с.
4. Кадыров И.Ш. Принципы, методы и алгоритмы построения микропроцессорных систем управления электромеханическими машинными агрегатами. Бишкек: КГТУ им. И. Раззакова. Изд-й центр Техник, 2007. 206 с.
5. Кадыров И.Ш., Постнов А.А. Применение компьютерной математики Matlab при проектировании систем управления тиристорным преобразователем. Известия КГТУ им. Раззакова, № 8, 2006. С. 141-147. Бишкек.
6. Кадыров И.Ш., Караева Н.С., Андарбеков Ж.А., Бактыбек уулу Азамат Модернизация системы автоматического регулирования возбуждением синхронного генератора малой гидроэлектростанции с целью безопасной эксплуатации гидроагрегата // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Т. 4, № 1. С. 197-205.
7. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
8. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Изд-во Энергия, 1973. – 400 с.
9. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Изд-во Наука, 1972. – 767 с.

Кадыров Ишенбек Шакирович

Д-р техн. наук, профессор каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 772 32-79-48
Эл. почта: bgtu_kg@mail.ru

Турусбеков Бактыбек Сагындыкович

Д-р техн. наук, проф. каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 555 640 990
Эл. почта: tbs200618@gmail.com

Жаныбекова Бермет Жаныбековна

Ст. преп. каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет
им. К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек
ул. Медерова 68
Тел.: (+996) 701 939 323
Эл. почта: ber-jan90@mail.ru

Нарымбетов Максат Сагыналиевич

Канд. техн. наук, заведующий каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
Кыргызский национальный аграрный университет им.
К.И. Скрябина
720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек,
ул. Медерова, 68
Тел.: (+996) 705 09-22-13
Эл. почта: maks_875@mail.ru

Кемелова Сабира Кемеловна

Ст. преп. каф. «Электрификация

и автоматизация сельского хозяйства»,

Кыргызский национальный аграрный университет

им. К.И. Скрябина

720005, Кыргызская Республика, г. Бишкек

ул. Медерова 68

Тел.: (+996) 551 03-64-26

Эл. почта: Kemelovasabira@gmail.com

*I.Sh. KADYROV, B.S. TURUSBKOV, B.Zh. ZHANYBEKOVA,
M.S. NARYMBETOV, S.K. KEMELOVA*

METHODS OF SYNTHESIS OF CURRENT REGULATORS IN THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL BY EXCITATION OF A SYNCHRONOUS GENERATOR OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS

The article reveals the increasing role of improving the energy situation in the northern regions of Kyrgyzstan, where the main consumers of electric energy are concentrated. Using the example of indicators of the hydropower potential of mountain rivers in this region, the role of increasing the share of small hydroelectric power plants in the production of electric energy in the energy sector of the republic is shown. As a result of a comparison of the existing automatic excitation control system at one of the MSPPS, taken as a standard one, as well as the upgraded system, presented as an alternative, problematic issues that had to be solved in this work were revealed. Based on the analysis of the existing automatic excitation control system (ARV) of a synchronous generator, their shortcomings have been identified and solutions have been identified to eliminate them. To achieve this goal, the upgraded system introduced changes in the power part of the synchronous generator exciter, in the control structure of the thyristor exciter, as well as in the structure of the ARV system. Unlike the typical ARV system being upgraded, a two-circuit current control system for the stator and rotor SG has been introduced instead of a voltage regulator. The transition to a two-circuit current control system for a synchronous generator made it possible to synthesize SG current regulators using the simplest methods that have proven themselves well in automatic control systems for DC electric drives. The main functions assigned to the current compounding unit (TC) in the automatic excitation control system in both static and dynamic modes associated with starting and stopping the generator, loading and unloading the SG load have been adjusted. The introduction of computing devices for calculating stator and rotor currents into the BTK structure improved protective measures and ensured reliable operation of the hydraulic unit. The above method of synthesizing synchronous generator current regulators has improved the performance of the upgraded automatic control system by excitation of a synchronous generator in static and dynamic modes, and has improved the efficiency of operation of the hydraulic unit's electrical equipment.

Keywords: automatic system, field blanking, hydropower installation, dynamic mode, machine exciter, voltage regulator, self-excitation, static mode, boost level, current compounding, thyristor exciter.

REFERENCES

1. Small hydropower plants as an alternative for Kyrgyzstan [Electronic resource]. Access mode: <https://knew.kg> (accessed July 15, 2019) (in Russian).
2. Construction and reconstruction of generating capacities [Electronic resource]. Access mode: www.invest.kg/ru/ (accessed July 15, 2019) (in Russian).
3. Terekov V. M. Elements of an automated electric drive. Moscow. Publisher «Energoatomizdat» 1987. 224 p. (in Russian).
4. Kadyrov I. Sh. Principles, methods and algorithms of construction of microprocessor control systems of Electromechanical machine units. Bishkek. KGTU named after I. Razzakov. Publisher «Teknik». 2007. 206 p. (in Russian)
5. Kadyrov I. Sh., Postnov A. A. Application of computer mathematics Matlab in designing control systems for thyristor converter. News of KSTU named after Razzakov. 2006. No. 8. P. 141-147. Bishkek (in Russian).
6. Kadyrov I. Sh., Karaeva N. S., Andarbekov Zh. A., Baktybek uulu Azamat Modernization of the automatic control system for excitation of a synchronous generator of a small hydroelectric power plant for the purpose of safe operation of the hydroelectric unit. High-Performance Computing Systems and Technologies. 2020. Vol. 4, No. 1. P. 197-205 (in Russian).
7. Klychev V. I. Theory of electric drive. Moscow. Publisher «Energoatomizdat». 1985. 560 p. (in Russian).
8. Kopylov I. P. Electromechanical energy converters. Moscow. Publisher «Energy». 1973. 400 p. (in Russian).
9. Bessekersky V. A., Popov E. P. Theory of automatic control systems. Moscow. Publisher «Science». 1972. 767 p. (in Russian)

Ishenbek Sh. Kadyrov.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department «Electrification and
automation of agriculture»,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
68, st. Mederov, Bishkek, 720005, Kyrgyzstan,
Phone: (+996) 772 32-79-48
E-mail: bgту_kg@mail.ru

Bermet Zh. Zhanybekova

Art. teacher Department «Electrification and
automation of agriculture»,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
68, st. Mederov, Bishkek, 720005, Kyrgyzstan,
Phone: (+996) 701 939 323
E-mail: ber-jan90@mail.ru

S.K. Kemelova

Art. teacher Department «Electrification and automation of
agriculture», Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
720005, Kyrgyzstan, Bishkek, st. Mederov, 68
Phone: (+996) 551 03-64-26
E-mail: Kemelovasabira@gmail.com

Baktybek S. Turusbekov.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.
Department «Applied Mechanics, Physics and engineering
pedagogy»,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
68, st. Mederov, Bishkek, 720005, Kyrgyzstan,
Phone: (+996) 555 640 990
E-mail: tbs200618@gmail.com

M.S. Narymbetov

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of
Electrification and Automation of Agriculture,
Skryabin Kyrgyz National Agrarian University,
720005, Kyrgyzstan, Bishkek, st. Mederov, 68
Phone: (+996) 705 09-22-13
E-mail: maks_875@mail.ru

УДК 53.08:621.317.2

В.Н. СЕДАЛИЦЕВ, Р.В. КРАЕВ, А.В. СЕУЛЕКОВ, Н.Н. КАЛИНИН

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНЫХ ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведены результаты анализа метрологических характеристик основных вариантов построения пьезотрансформаторных измерительных преобразователей (ПТ ИП) с логометрическим выходом. Исследования проводились с использованием методов имитационного моделирования. Конструктивно ПТ ИП представляет собой колебательную систему с двумя степенями свободы. Чувствительным элементом (ЧЭ) на базе составного пьезоэлектрического трансформатора (ПЭТ) может являться вибратор, либо элементом связи между резонаторами. Выходным параметром датчика такого типа является отношение выходных напряжений, снимаемые с обкладок одного ПЭТ, измеренных на двух резонансных частотах или выходные напряжения двух взаимосвязанных ПЭТ. При изменении параметров ЧЭ происходит перераспределение колебательной энергии между двумя степенями свободы в системе. Это позволяет реализовать два способа формирования выходного сигнала ИП. В одном случае используется отношение выходных напряжений, снимаемых с двух ПЭТ на одной из нормальных или парциальных частот. В другом случае, в качестве выходного параметра ИП используется отношение выходных напряжений, снимаемых с одного ПЭТ, но измеренных на двух разных частотах. Таким образом, использование в процессе измерений различных типов связанных колебаний в системе, в частности, синфазных и противофазных колебаний резонаторов, возбуждаемых на соответствующих нормальных и парциальных частотах, позволяет повысить чувствительность и избирательность ИП по отношению к измеряемым воздействиям и снизить чувствительность к воздействию других факторов.

Ключевые слова: датчик вибрационного типа, датчик с логометрическим выходом, составной пьезотрансформатор, связанные колебания, колебательная система с двумя степенями свободы, имитационное моделирование, вязкость, плотность.

Введение

Особенностью ИП с двумя и более степенями свободы на базе составных ПЭТ является то, что измеряемое воздействие может прикладываться к специальному вибратору (В) или к элементу связи (ЭС) между взаимодействующими резонаторами. Это позволяет защитить пьезоэлемент от дестабилизирующих воздействий. Используя конструкцию чувствительного элемента (ЧЭ) в виде составного ПЭТ, определенный уровень связи в системе и соответствующий способ формирования выходного сигнала ИП, можно обеспечить высокую чувствительность и избирательность измерительного процесса.

Сравнительный анализ метрологических характеристик ИП и результатов моделирования

В настоящее время одной из актуальных задач в приборостроении является разработка универсальных, многофункциональных и многопараметрических датчиков, способных измерять несколько параметров объектов. Очевидно, что достижения этой цели необходимо обеспечить повышение чувствительности и избирательной способности измерительных устройств по отношению к определенным параметрам объекта.

В настоящее время для измерения разнообразных параметров объектов используют электро-механические датчики вибрационного типа [1-3]. Например, для измерения температуры, вязкости, плотности жидких сред и других параметров широко применяют пьезорезонансные датчики (ПРД). Это обусловлено тем, что ПРД обладают такими преимуществами, как малые размеры, простота конструкции, технологичность изготовления, низкая стоимость, высокое быстродействие, надежность в работе, устойчивость к внешним воздействиям [4, 5].

Одной из разновидностей ПРД являются датчики на базе составных пьезотрансформаторов [6, 7, 8, 9]. К настоящему времени разработаны опытные образцы датчиков статических усилий, давления газа, уровня сыпучих материалов, вязкости жидких сред, скорости потока и др. [10, 11-15]. Одной из причин, сдерживающих разработку и более широкое практическое внедрение измерительных устройств такого типа, является недостаточная проработка теоретических и практических вопросов, связанных с их проектированием, изготовлением и эксплуатацией. В данной работе представлены результаты сравнительного анализа метрологических характеристик ИП с двумя

степенями свободы на базе составных пьезотрансформаторов, выполненного с использованием имитационного моделирования. Предложенные рекомендации могут быть использованы при разработке и проектировании измерительных устройств такого типа.

Очевидно, что в датчиках резонансного типа преобладает мультипликативная составляющая погрешности измерения, поэтому в рассматриваемых устройствах применим логометрический вариант построения измерительной схемы. Для сравнительной оценки метрологических характеристик рассматриваемых вариантов построения ИП будем использовать соотношение коэффициентов относительной чувствительности (КОЧ) и коэффициент относительной избирательности (КОИ) процесса измерительного преобразования: $y = f(x, t)$, x – измеряемый параметр, t – влияющий фактор.

$$\text{КОЧ} = \frac{dy}{y} \cdot \frac{dx}{x}; \quad \text{КОИ} \approx \frac{\left(\frac{dy}{y} \cdot \frac{dx}{x}\right)}{\left(\frac{dy}{y} \cdot \frac{dt}{t}\right)}.$$

Из теории колебаний известно, что при сильной связи в системе с двумя степенями свободы ее амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имеет двугорбый вид [15, 16].

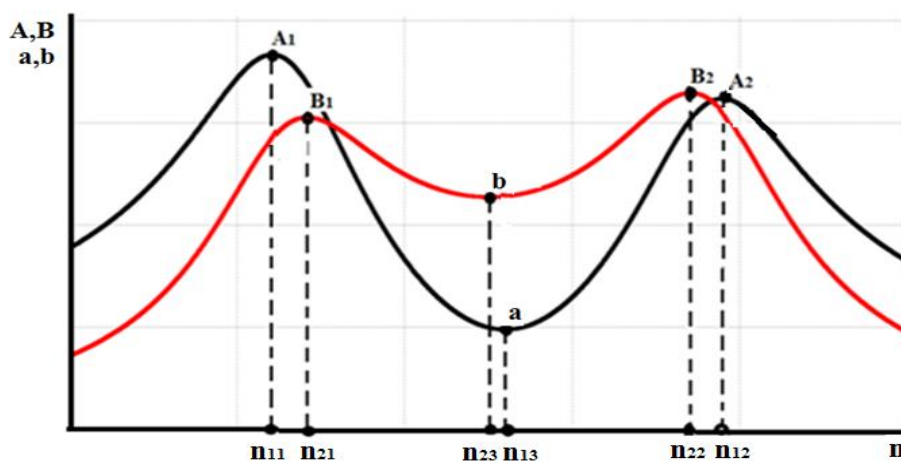


Рис. 1. АЧХ сильно связанной системы с двумя степенями свободы

При анализе вариантов построения ИП с двумя степенями свободы будем использовать следующие параметры:

- $n_{11}; n_{21}; n_{12}; n_{22}$ – нормальные частоты синхронизации (НЧС) синфазных и противофазных колебаний резонаторов;
- $n_{13}; n_{23}$ – парциальные частоты (ПЧ) колебаний резонаторов;
- $A_1; A_2; B_1; B_2$ – амплитуды колебаний в контурах на НЧС;
- $a; b$ – амплитуда колебаний резонаторов на ПЧ.

Для формирования выходных сигналов ИП с логометрическим выходом будем использовать КРАК резонаторов на одной из частот и ОАК одного из резонаторов на разных частотах:

- $\chi_{BA} = \frac{B}{A}$ КРАК двух резонаторов на одной из НЧС;
- $\chi_{ab} = \frac{a}{b}$ КРАК двух резонаторов на ПЧ;
- $\chi_{AA} = \frac{A_2}{A_1}$ ОАК резонатора на 1НЧС и 2НЧС;
- $\chi_{aA} = \frac{a}{A}$ ОАК резонатора на ПЧ и НЧС;

При изменении параметров в одном из резонаторов или в элементе связи между ними происходит перераспределение колебательной энергии между степенями свободы. В ПТ ИП взаимодействующими степенями свободы являются ПЭТ и вибратор, а также их синхронизированные синфазные и противофазные колебания. Это обстоятельство позволяет реализовать два способа формирования выходного сигнала датчика. В одном случае в качестве выходного сигнала ИП будем использовать коэффициент распределения амплитуд колебаний (КРАК) резонаторов на одной из нормальных или парциальных частот, а в другом – для формирования выходного сигнала ИП бу-

дем использовать отношение амплитуд колебаний (ОАК) одного из резонатора, но измеренных на двух разных частотах.

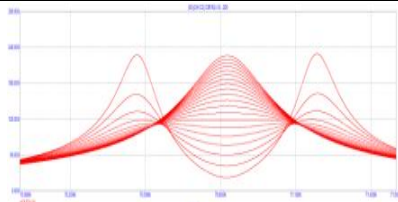
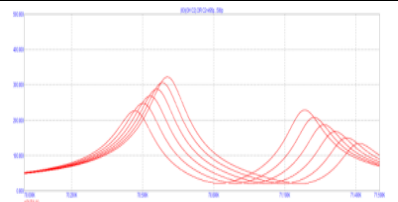
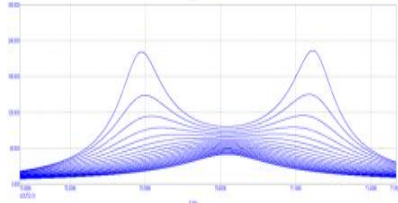
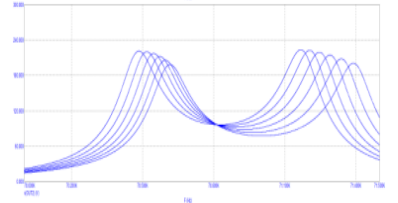
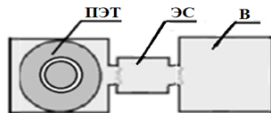
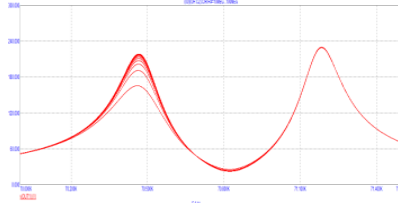
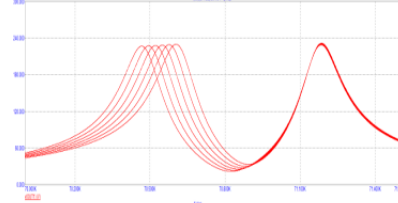
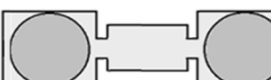
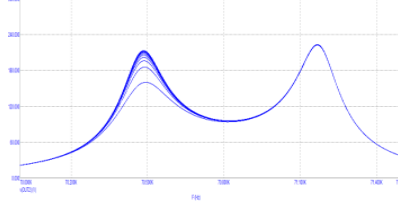
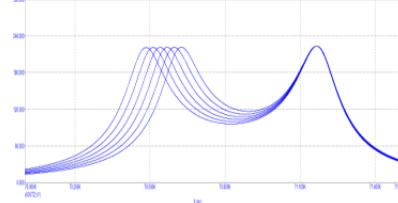
Практический интерес представляют следующие варианты конструктивного и схемного исполнения ИП такого типа:

- с одним или двумя ПЭТ;
- с элементом связи или вибратором в качестве ЧЭ;
- с выходом по КРАК или ОАК.

При этом модулируемыми параметрами эквивалентной электрической схемы замещения (ЭЭСЗ) ИП могут являться R , C , L (аналоги, соответственно, трения, вязкости, акустических потерь, упругости, плотности исследуемой среды и резонаторов).

Таблица 1

Варианты конструктивного исполнения ПТ ИП с двумя степенями свободы

ЧЭ	Конструкция ЧЭ ИП	Модулируемый параметр ЭЭСЗ ЧЭ ИП	
		R	C(L)
Вибратор			
			
Элемент связи			
			

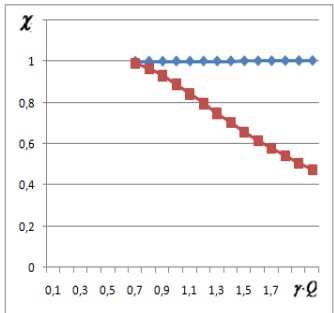
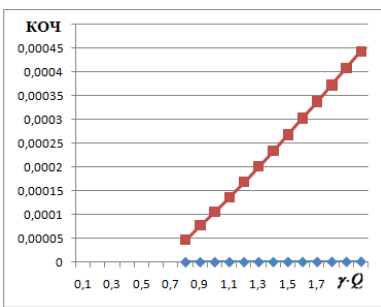
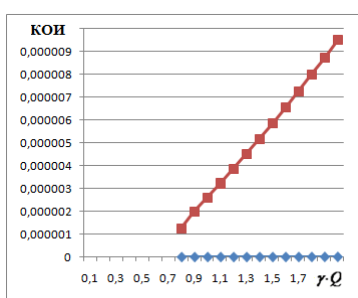
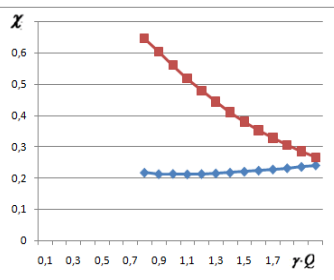
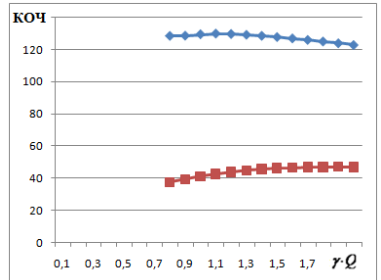
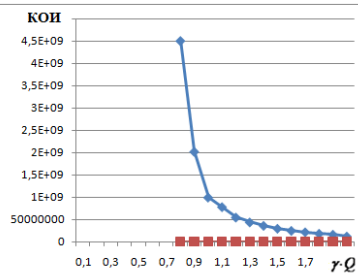
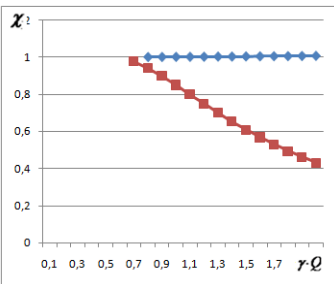
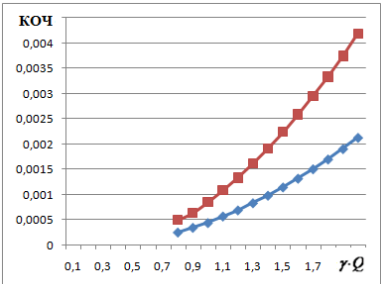
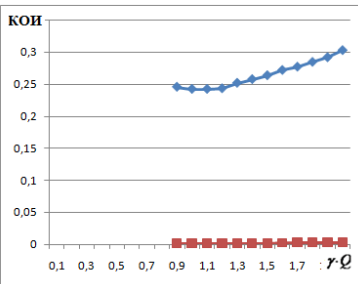
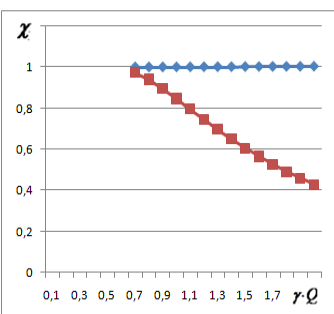
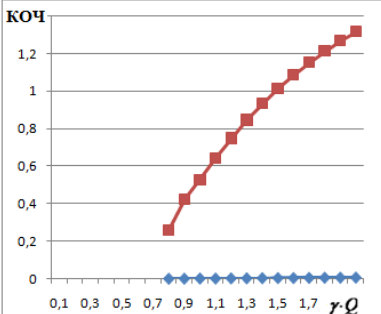
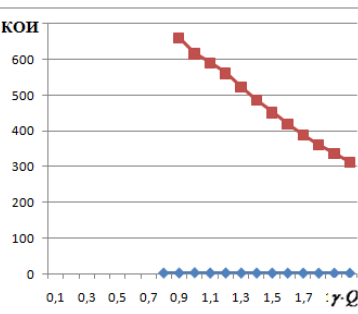
Аналитические зависимости, описывающие связанные колебания даже в простейших системах с двумя степенями свободы имеют достаточно сложный вид, не наглядны, что затрудняет анализ режимов работы устройств, оптимизацию конструкций ЧЭ, определение таких важных показателей как КОЧ и КОИ. Поэтому для решения этих задач было применено имитационное моделирование рабочих режимов ИП [16-18].

В Таблицах 2 и 3 представлены результаты имитационного моделирования различных вариантов конструктивного исполнения ЧЭ (с вибратором и элементом связи в качестве ЧЭ), способов формирования выходных сигналов (КРАК, ОАК) в функции обобщенного коэффициента связи в системе $\gamma \cdot Q$ (γ - коэффициент связи, Q – добротность резонаторов). При моделировании ИП использовались высокодобротные резонаторы с малой расстройкой собственных частот. Модулиру-

емыми параметрами ЧЭ являются параметры R, C, L эквивалентной электрической схемы замещения (ЭЭСЗ) ИП.

Таблица 2

Выходные характеристики ИП с одним ПЭТ

ЧЭ		Метрологические характеристики ИП		
		ОАК	КОЧ	КОИ
Модулируемые параметры ЭЭСЗ вибратора	R			
	C(L)			
Модулируемые параметры ЭЭСЗ элемента связи	R			
	C(L)			

Цветовое обозначение графиков на рисунках: $\blacksquare$ $|\chi_{AA}|$; $\blacklozenge$ $\chi_{A\Delta}$.

Таблица 3

Выходные характеристики ИП с двумя ПЭТ

ЧЭ		Метрологические характеристики ИП		
		КРАК	КОЧ	КОИ
Модулируемые параметры ЭЭС3 вибратора	R			
	C(L)			
Модулируемые параметры ЭЭС3 элемента связи	R			
	C(L)			

Цветовое обозначение графиков на рисунках: $\color{blue}\blacklozenge \chi_{BA}$; $\color{purple}\times \chi_{ab}$.

Результаты имитационного моделирования позволяют произвести выбор вариантов построения ИП, применимых для решения конкретных задач. Например, при использовании вибратора в качестве ЧЭ большие значения КОЧ при модуляции R способны обеспечивать варианты ИП с вы-

ходом по КРАК на НЧС (χ_{BA}) в режиме слабой связи в системе, а так же с выходом по ОАК (χ_{AA}) и КРАК на ПЧ (χ_{ab}) при сильной связи в системе. Как следует из приведенных графиков, более предпочтительным вариантом исполнения ИП является применение вибратора в качестве ЧЭ. Реализация режима сильной связи в системе и использование отношения напряжений (χ_{AA}), снимаемых с одного ПЭТ на двух частотах, позволяет обеспечить высокую чувствительность и избирательность измерительного процесса. Это достигается за счет снижения влияния плотности жидкости на результат измерения ее вязкости (при этом уменьшается влияние фактора «квазивязкости»).

К преимуществам ИП с выходом по КРАК можно отнести простоту измерительной схемы, высокое быстродействие по сравнению с использованием выхода по ОАК, так как при этом не требуется производить переключения рабочих частот ИП.

Достоинством схем ПТ ИП с выходом по ОАК является то, что при этом можно использовать конструкцию с одним ПЭТ. Это позволит исключить влияние неидентичности изменения параметров взаимосвязанных ПЭТ во времени и при воздействии дестабилизирующих факторов.

Заключение

Особенностью измерительных устройств данного типа является то, что в них реализуются различные механизмы чувствительности ИП за счет возбуждения соответствующих комбинаций взаимосвязанных колебаний резонаторов на разных частотах. Это позволяет производить измерения с помощью одного ИП нескольких параметров объекта, например, вязкости, плотности и упругости жидких сред. В трибометрии это могут быть коэффициенты трения покоя, трогания, движения твердых тел и др. В свою очередь, применение разных способов формирования выходного сигнала ИП позволяет повышать чувствительность к измерению одних параметров и снижать чувствительность по отношению к другим его параметрам, обеспечивать, таким образом, избирательность измерительного процесса, повышать точность измерительных устройств.

К достоинствам ИП на базе составных ПЭТ можно отнести простоту конструкции и технологичность изготовления ЧЭ, низкую стоимость, применимость для работы в тяжелых условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Базило К.В., Куницкая Л.Г. Пьезокерамические трансформаторы и датчики. / Под ред. В.М. Шарапова. //Черкассы: Вертикаль, 2010. 278 с.
2. Низаметдинов А.М. Измерение добротности и собственной частоты колебательной системы вибровискозиметрического датчика / Низаметдинов А.М. // Датчики и системы. 2016. №10. С. 15–20.
3. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K., Dufour I. and Jakoby B. "Reduced order models for resonant viscosity and mass density sensors" Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 220. P. 76–84. DOI: 10.1016/j.sna.2014.09.006
4. Hadidi S. and Hassanzadeh A. "A Novel Self-Powered, High-Sensitivity Piezoelectric Vibration Sensor Based on Piezoelectric Combo Effect". In IEEE Sensors Journal. 2023. Vol. 23. No. 21. P. 25797-25803. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3317445
5. Lee C.K., Hsu Y.H., Hsiao W.H. and Wu Jeremy W.J. "Electrical and mechanical field interactions of piezoelectric systems: foundation of smart structures-based piezoelectric sensors and actuators, and free-fall sensors" Smart Materials and Structures. 2004. Vol. 13. No. 5. P. 1090. DOI: 10.1088/0964-1726/13/5/015.
6. Седалищев В. Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи: монография. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015. 167 с.
7. Соломин Б.А. Миниатюрный высокочувствительный и быстродействующий вибровискозиметрический датчик/ Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский, М.Л. Конторович // Конструирование и производство датчиков, приборов и систем. 2015. С. 3–8.
8. Spletzer M., Raman A., Wu A. Q., Xu X. Ultrasensitive mass sensing using mode localization in coupled microcantilevers // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88, 254102.
9. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 3). Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. 346 с.
10. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / под ред. В.М. Шарапова. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
11. Янчик В.В., Панич А.Е., Янчик Вл.В. О возможности реализации интегрированных многофункциональных преобразователей пьезоэлектрических датчиков физических величин // Сб. тр. VII Междунар. науч.-технич. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. С. 129-132.
12. Sedalischew V.N., Sergeeva I.a.S., Simulation of measuring transducers based on interconnected piezoresonators //International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2020. Barnaul, 24-25 April 2020. / J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1615, article: 012030.

13. Sedalishchev V.N., Sergeeva I.a.S., Strahatov D.O. Simulation modeling of composite piezotransformer measuring transducer with differential output //XI International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2021. Barnaul, 21-22 May 2021. / J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 2142. Article ID: 012018.
14. Янчик В.В., Панич А.Е., Янчик Вл.В. Перспективы применения интегрированных многофункциональных преобразователей в пьезоэлектрических датчиках механических величин // Инженерный вестник Дона. 2010. № 3. <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/209/>.
15. Янчик В.В., Янчик Вл.В. Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития): монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2013. 142 с.
16. Янчик В.В., Панич А.Е. Управление характеристиками пьезоэлектрических датчиков с интегрированными многофункциональными преобразователями // Матер. V Междунар. конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. С. 329-334.
17. Янчик Вл.В., Панич А.Е. Двухпараметровый пьезоэлектрический преобразователь // Сб. тр. Междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. С. 179-180.
18. Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении: монография // Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 6. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. 240 с.

Седалищев Виктор Николаевич

Доктор технических наук, профессор каф.
«Вычислительной техники и электроники»,
Институт цифровых технологий, электроники и физики,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 90
Тел.: +7(3852) 380-751
Эл. почта: sedalischew@mail.ru

Краев Роман Владимирович

Аспирант каф. «Радиофизика и теоретическая физика»,
Институт цифровых технологий, электроники и физики,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 90
Тел.: +7(3852) 296-668
Эл. почта: kraev.roma1020@ya.ru

Сеулеков Алексей Валерьевич

Преподаватель каф. «Вычислительной техники
и электроники»,
Институт цифровых технологий, электроники и физики,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 90
Тел.: +7(3852) 380-751
Эл. почта: seulekov@mail.asu.ru

Калинин Никита Николаевич

Аспирант каф. «Вычислительной техники и электроники»,
Институт цифровых технологий, электроники и физики,
Алтайский государственный университет
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 90
Тел.: +7(3852) 380-751
Эл. почта: nik.nikita.kalinin.98@mail.ru

V.N. SEDALISHCHEV, R.V. KRAEV, A.V. SEULEKOV, N.N. KALININ

INVESTIGATION OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE PIEZOTRANSFORMER MEASURING TRANSDUCERS USING THE SIMULATION METHOD

The results of the analysis of metrological characteristics of the main variants of construction of piezotransformer measuring transducers (PT MT) with logometric output are presented. The research was carried out using simulation modelling methods. Structurally, the PT MT is an oscillating system with two degrees of freedom. The sensitive element (SE) based on a compound piezoelectric transformer (PET) can be a vibrator or a coupling element between resonators. The output parameter of this type of sensor is the ratio of output voltages taken from the linings of one PET measured at two resonant frequencies or the output voltages of two interconnected PET. When changing the parameters of the PE, the vibrational energy is redistributed between the two degrees of freedom in the system. This allows realising two ways of forming the output signal of the FE. In one case, the ratio of output voltages taken from two PET at one of the normal or partial frequencies is used. In the other case, the ratio of output voltages taken from one PET but measured at two different frequencies is used as an output parameter of the MT. Thus, the use of different types of coupled oscillations in the system during measurements, in particular, in-phase and antiphase oscillations of resonators excited at the corresponding normal and partial frequencies, makes it possible to increase the sensitivity and selectivity of the MT with respect to the measured influences and to reduce the sensitivity to the influence of other factors.

Key words: vibration type sensor; sensor with logometric output; compound piezotransformer; coupled oscillations; oscillating system with two degrees of freedom; simulation modelling; viscosity; density.

REFERENCES

1. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Bazilo K.V., Kunitskaya L.G. Ed. Sharapov V. *Piezoceramic transformers and sensors*. Cherkassy. Vertical. 2010. P. 278 (in Russian)
2. Nizametdinov A.M. Measurement of Q-Factor and Eigen Frequency of Oscillatory System of Viscosity Sensor. *Datchikiisistemy. Journal*. 2016.No. 10. P. 15–20 (in Russian).
3. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K., Dufour I. and Jakoby B. Reduced order models for resonant viscosity and mass density sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 220. P. 76–84. DOI: 10.1016/j.sna.2014.09.006
4. Hadidi S. and Hassanzadeh A. A Novel Self-Powered, High-Sensitivity Piezoelectric Vibration Sensor Based on Piezoelectric Combo Effect. In *IEEE Sensors Journal*, 2023. Vol. 23. No. 21. P. 25797-25803. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3317445
5. Lee C.K., Hsu Y.H., Hsiao W.H. and Wu Jeremy W.J. Electrical and mechanical field interactions of piezoelectric systems: foundation of smart structures-based piezoelectric sensors and actuators, and free-fall sensors. *Smart Materials and Structures*. 2004. Vol. 13. No. 5. P. 1090. DOI: 10.1088/0964-1726/13/5/015.
6. Sedalishchev V.N. *Piezotransformer Measuring Transducers: monograph*. AltGU. Barnaul: Izd-vo AltGU. 2015. P. 167 (in Russian).
7. Solomin B.A., Nizametdinov A.M., Chertoriyskiy A.A., Kontorovich M.L. Miniature, highly sensitive and fast vibration viscometric sensor. *Konstruirovaniye i proizvodstvo datchikov, priborov i system*. Journal. 2015. P. 3–8 (in Russian).
8. Spletzer M., Raman A., Wu A. Q., Xu X. Ultrasensitive mass sensing using mode localization in coupled microcantilevers. *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88, 254102.
9. Bogush M.V. *Piezoelectric Sensors for Extreme Operating Conditions*. (Piezoelectric instrumentation. Vol. 3). Rostov-na-Donu: Izd-vo SKNC VSH, 2006. 346 p. (in Russian)
10. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *Piezoelectric Sensors*. Moscow. Texnosfera. 2006. 632 p. (in Russian)
11. Yanchich V.V., Panich A.E., Yanchich V.V. On the Possibility of Realisation of Integrated Multifunctional Transducers of Piezoelectric Sensors of Physical Quantities. *Sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-technich. konf. «Innovacionnyye process p'ezoelektricheskogo priboro-stroeniya I nanotexnologij»*. Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU. 2010. P. 129-132 (in Russian)
12. Sedalishchev V.N., Sergeeva I.A. Simulation of Measuring Transducers Based on Interconnected Piezoresonators. *X International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2020*. Barnaul, 24-25 April 2020. *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 1615. Article ID 012030.
13. Sedalishchev V.N., Sergeeva I.A., Strahatov D.O. Simulation modeling of composite piezotransformer measuring transducer with differential output. *XI International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2021*. Barnaul, 21-22 May 2021. *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 2142, Article ID 012018.
14. Yanchich V.V., Panich A.E., Yanchich V.V. Prospects of Application of Integrated Multifunctional Transducers in Piezoelectric Sensors of Mechanical Quantities. *Inzhenernyy vestnik Dona*. № 2010. № 3. <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/209/> (in Russian)
15. Yanchich V.V., Yanchich V.V. *Converters of Piezoelectric Sensors of Mechanical Quantities (constructions and ways of development): monograph*. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland. 2013. 142 p. (in Russian)
16. Yanchich V.V., Panich A.E. Control of Characteristics of Piezoelectric Sensors with Integrated Multifunctional Converters. *Mater. v Mezhdunar. konf. «Geoinformacionnyeologii I kosmicheskij monitoring»*. Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2012. P. 329-334 (in Russian)
17. Yanchich V.V., Panich A.E. Two-Parameter Piezoelectric Transducer. *Sb. tr. Mezhdunar. Molodezhnoj nauchnoj konf. «Aktual'-nye problem p'ezoelektricheskogo priborostroeniya»*. Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2013. P. 179-180 (in Russian)
18. Mitko V.N., Kramarov Yu.A., Panich A.A. Mathematical Modelling of Physical Processes in Piezoelectric Instrumentation: monograph. *P'ezoelektricheskoe priborostroenie*. Vol. 6. Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2009. 240 p. (in Russian)

Victor N. Sedalishchev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Science and Electronics,
Altai State University
90, Krasnoarmeysky prosp., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7(3852) 296-664, E-mail: sedalishchev@mail.ru

Alexey V. Seulekov

Lecturer,
Department of Computer Science and Electronics,
Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics,
Altai State University
90, Krasnoarmeysky prosp., Barnaul, Russia, 656049
Тел.: +7(3852) 296-664, E-mail: seulekov@mail.asu.ru

Roman V. Kraev

Postgraduate student,
Department of Radiophysics and Theoretical Physics,
Altai State University
90, Krasnoarmeysky prosp., Barnaul, Russia, 656049
Phone: +7(3852) 296-668, E-mail: kraev.roma1020@ya.ru

Nikita N. Kalinin

Postgraduate student,
Department of Computer Science and Electronics,
Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics,
Altai State University
90, Krasnoarmeysky prosp., Barnaul, Russia, 656049
Тел.: +7(3852) 296-664, E-mail: nik.nikita.kalinin.98@mail.ru

ПРИБОРНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ

Описан приборный комплекс контроля гидрофизических параметров пресноводных водоемов. Приведены структурные схемы измерительных устройств комплекса, описаны принципы их работы. Приводятся результаты моделирования измеренных значений температуры, скорости и направления течений на различных глубинах участков акватории Телецкого озера в летний период 2024 г.

Ключевые слова: спектральная подводная освещенность, скорость и направление течений, температура, измерительный комплекс, пресноводные водоемы.

Введение

Значимыми гидрофизическими параметрами для оценки состояния водоемов являются прозрачность, освещенность, температура, скорость течения, концентрация органических веществ. Для осуществления фотосинтеза требуется определенная интенсивность солнечного света. Температурная стратификация влияет на видовой состав и биоразнообразие гидробионтов. Исследование концентраций органических веществ позволяет оценить качество воды, изучить процессы самоочищения водоема. Течения показывают перенос веществ внутри водоема, позволяют оценить процессы миграции [1]. Высокая стоимость приборов комплексного контроля гидрофизических параметров водоема, а также их крупные размеры не всегда позволяют проводить массовый и оперативный контроль континентальных водных объектов. В связи с этим необходим приборный комплекс, состоящий из ряда измерительных устройств, позволяющий производить контроль гидрофизических параметров как с маломерных судов, так и со стационарных или передвижных пунктов контроля.

Устройство контроля спектральной подводной освещенности

С целью контроля спектральной подводной освещенности разработана измерительная установка, которая состоит из двух герметичных головок с интерференционными светофильтрами, установленными на поворотных дисках, приходящих в движение при помощи шагового двигателя. Обе измерительные головки имеют прозрачные входные окна, падающий свет через которые, проходя через интерференционные светофильтры, регистрируется фотодиодами, соединенными с блоком обработки данных (БОД). Измерительные головки и БОД связаны между собой гибким многожильным кабелем. Более подробно структура и принцип работы описаны в работах [2, 3].

Устройство контроля малых скоростей течения

За основу взято водоизмерительное устройство СГВ–15. Счетный механизм удален из конструкции (см. рис. 1).

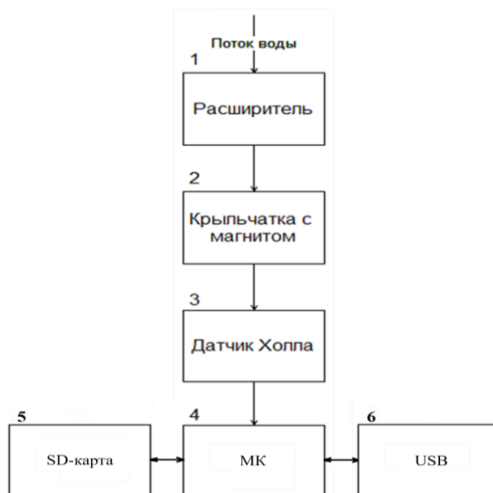


Рис. 1. Структурная схема устройства контроля малых скоростей течения

Крыльчатка (2) взаимодействует через водонепроницаемую диафрагму посредством постоянных магнитов с установленными в герметичный корпус счетчика датчиками Холла (3) для получения сигнала, который обрабатывает микроконтроллер (МК) (4). С целью повышения чувствительности на входной патрубок устанавливается расширительная воронка (1). В ходе калибровки установлено, что предельная чувствительность устройства равняется 1 мм/с. Поворотная конструкция обеспечивает возможность измерения как горизонтального, так и вертикального профиля скорости течения воды. Данные записываются на SD-карту (5). Через USB-разъем (6) возможно подключение к ПК (рис. 1).

Устройство контроля температуры

Устройство контроля «профиля» температуры представляет собой последовательное соединение температурных цифровых датчиков типа DS18B20, закрепленных на кевларовом шпагате (рис. 2). Устройство погружается на определенную глубину, определяющуюся количеством датчиков (20-60 шт.), расположенных на определенном расстоянии друг от друга (0.5-1м).

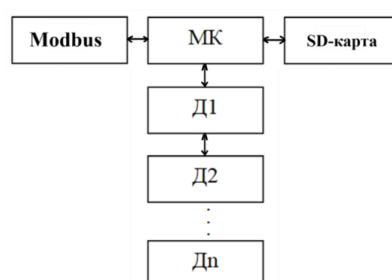


Рис. 2. Структурная схема устройства контроля температуры водоема

Устройство контроля подледной освещенности



Рис. 3. Структурная схема устройства контроля подледной освещенности

Через лёд в воду проходит лишь малая доля света за день. Это связано как с большой толщиной льда, его структурой, так и с наличием снеговой шапки на поверхности, что затрудняет прохождение света. Для интегральной оценки освещенности используется кремниевый фотоумножитель, который создаёт импульсный выходной сигнал при обнаружении единичного фотона (рис. 3).

Блок сбора и обработки данных

Блок необходим для получения данных от измерительных устройств приборного комплекса, сохранении и отображении информации, поступающих с датчиков.

Микроконтроллер STM32F407VG (1) выполняет сбор данных с подключенных измерительных приборов, структурирует полученные данные, отправляет мгновенные показания на дисплей, сохраняет историю измерений на SD-карту. Дисплей LCD12864 (2) служит для отображения мгновенных значений измерений пользователю. Кнопки (3) реализуют взаимодействие пользователя с устройством. SD-карта (4) служит хранилищем измеренных значений. Драйверы (5-8) протокола RS-485 на базе микросхемы ADM485 конвертируют сигналы с микроконтроллера в протокол RS-485. Разъемы (9-12) необходимы для подключения измерительных устройств по протоколу

ModBus-ASCII. Порт USB (13) используется для считывания данных с SD-карты через интерфейс USB (рис. 4).

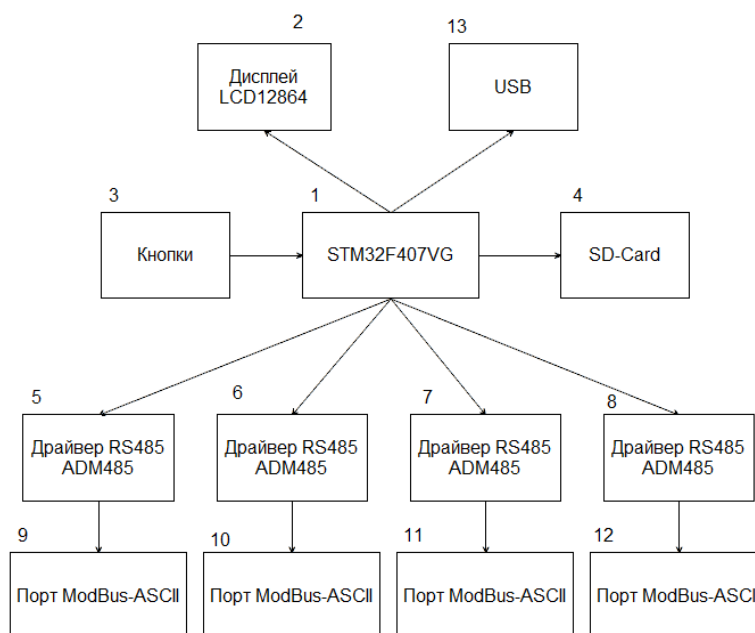


Рис. 4. Структурная схема блока сбора и обработки данных

Программа хранения и моделирования измеренных значений

Программа хранения и моделирования измеренных значений разработана на графическом движке GodotEngine, позволяет строить графики измеренных параметров освещенности, температуры, скорости и направления течений, а также концентрации органических веществ по глубине в 2D и 3D – видах. Длина вектора на 3D-модели характеризует скорость потока, а направление – положение течения относительно частей света. Температура отображается в виде числа, цвет которого меняется в зависимости от текущего значения температуры – от теплого оттенка до холодного. Концентрация отображается в виде облака точек. Чем выше концентрация, тем плотнее облако. Для построения облака используется класс «Сетка», который содержит геометрию на основе массива вершин, разделённую на поверхности. Каждая поверхность содержит отдельный массив и материал, используемый для её отрисовки (рис. 5, 6). С целью визуализации экспериментальных значений временного ряда в программе предусмотрена покадровая демонстрация. Можно вручную выбрать необходимый кадр при помощи слайдера либо запустить просмотр всего процесса моделирования нажатием кнопки *Старт*.

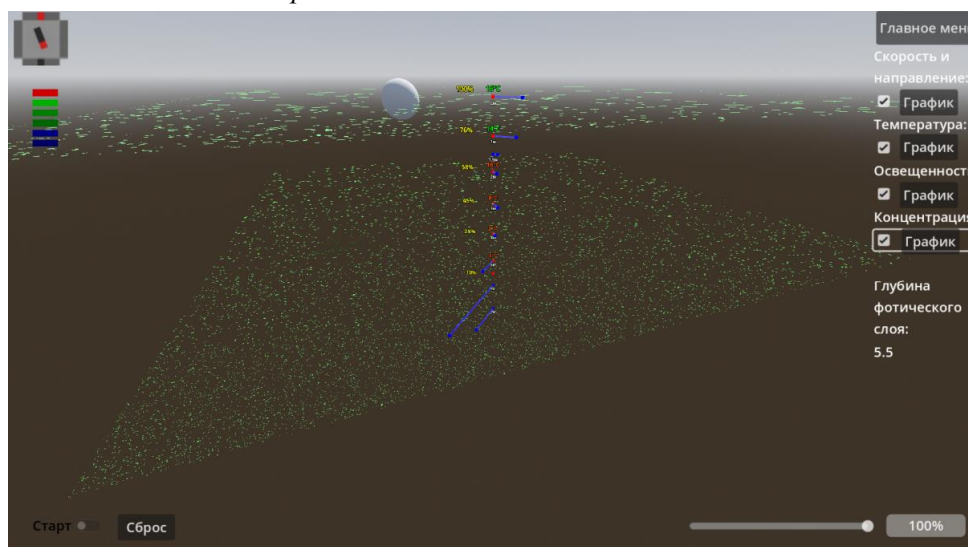


Рис. 5. 3D-модель изменения гидрофизических параметров водоёма по глубине

Стандартный класс «Camera3D» используется для отображения из текущего местоположения, позволяет изменять масштаб модели, перемещать ее, разворачивать отображаемые векторы и поверхности. Первоначально масштаб устанавливается относительно размеров наибольшего отображаемого объекта.

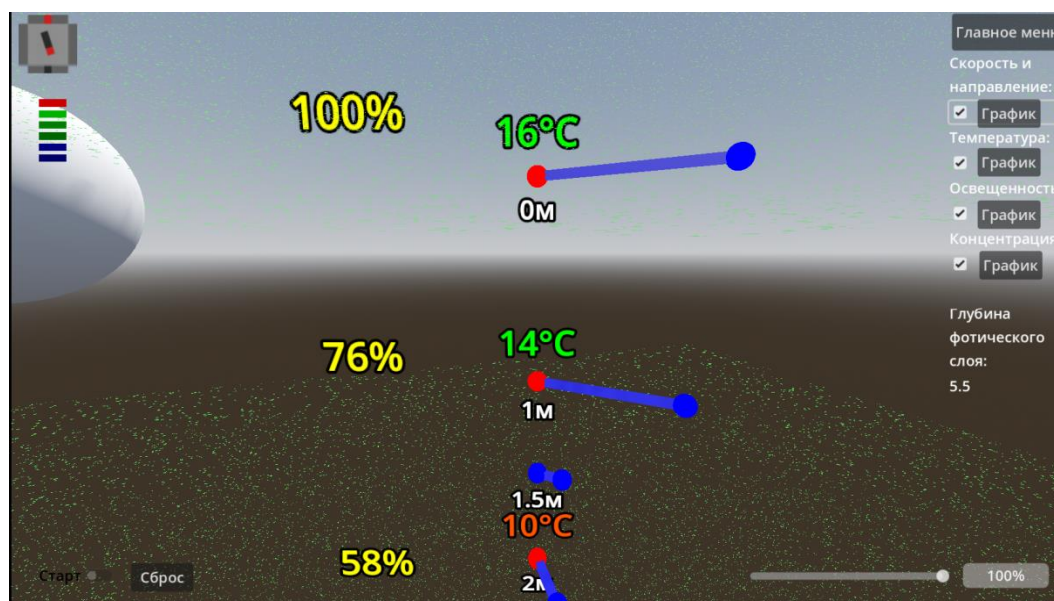
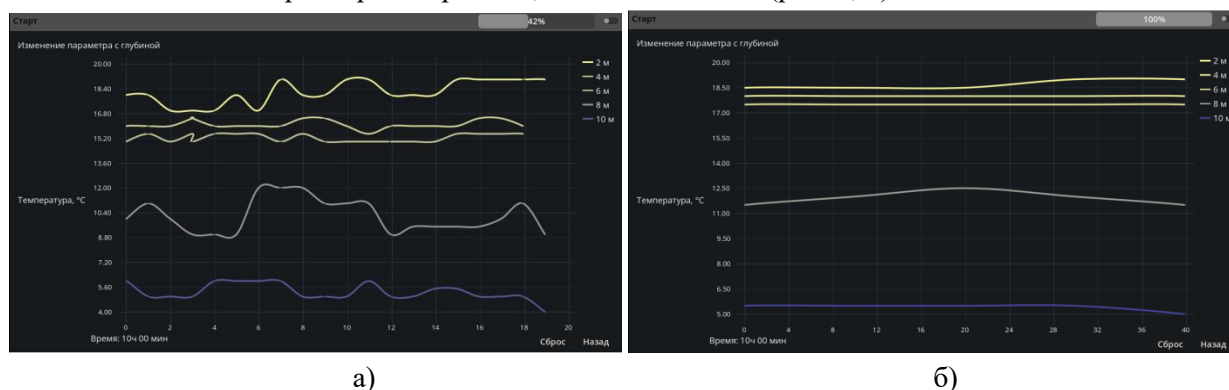


Рис. 6. 3D-модель изменения гидрофизических параметров водоема по глубине (увеличен масштаб)

Программа дает возможность строить графики измеренных значений и визуализировать изменение как одного параметра во времени, так и нескольких (рис. 7, 8).



а)

б)

Рис. 7. Графики изменения температуры водоема по глубине: а – до интерполяции, б – после интерполяции

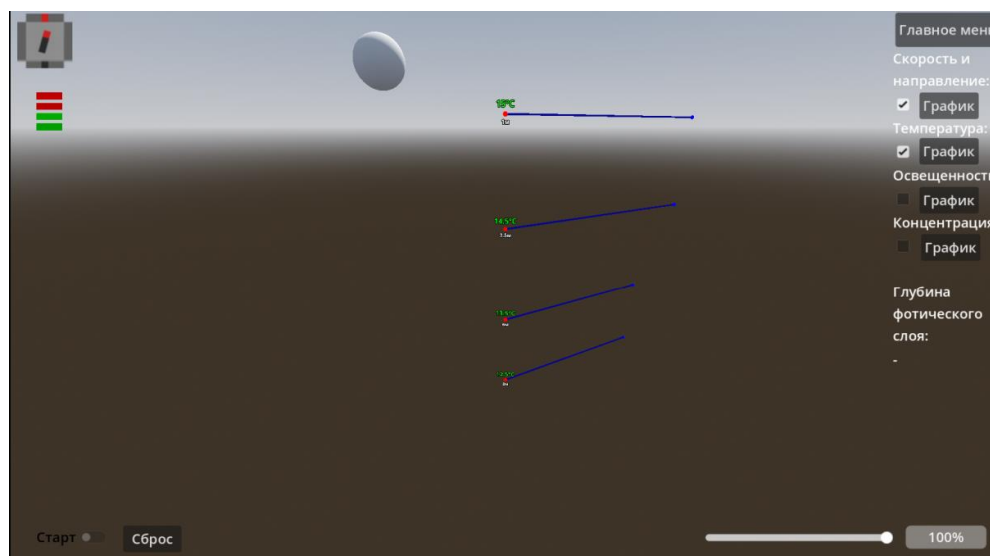


Рис. 8. 3D-модель изменения скорости, направления течения и температуры водоема по глубине

3D-модель позволяет производить оценку взаимного влияния связанных гидрофизических параметров. С целью построения плавных переходов на графиках и исключения выбросов и незначительных флуктуаций в рядах данных используется векторная интерполяция и усреднение по некоторому числу точек (в зависимости от количества измеренных значений) (рис. 7, 8). Измерения проведены в заливе Кыга (07.08.2024 г.).

Заключение

В результате работы разработан приборный комплекс, включающий устройства контроля гидрофизических параметров пресноводных водоемов: освещенности, температуры, скорости течения, а также программа для построения 3D-модели по значениям измеренных параметров. Устройства проходили испытания на континентальных водных объектах Республики Алтай и Новосибирской области в 21-24 гг. Измерения вертикальных потоков течений на озере Манжерокское с использованием датчика контроля скорости позволили установить наличие подводных источников, способствующих перемешиванию придонных отложений и повышению мутности воды [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002. Т. 1. 276 с.
2. Суторихин И.А., Кривобоков Д.Е., Соловьев В.А., Каменев А.Р. Способ и устройство измерения распределения спектральной солнечной освещенности в фотическом слое водоемов // Патент № 2817043 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/59.: № 2022130488: заявл. 23.11.2022: опубл. 09.04.2024 / заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный университет".
3. Суторихин, И.А., Соловьев В.А., Кривобоков Д.Е. Измерительный комплекс для оценки спектральной подводной освещенности на разных глубинах водоемов // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 4(138). С. 42-48. DOI 10.14258/izvasu(2024)4-05.
4. Суторихин И. А., Кириллов В. В., Литвиненко С. А. [и др.] Гидрофизические характеристики озера Манжерокского после дноуглубительных работ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 3. С. 115-126. DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-10.

Суторихин Игорь Анатольевич

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и теоретической физики ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр-т Красноармейский, 90, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Эл. почта: sia@iwer.ru

Соловьев Виталий Андреевич

Ст. преподаватель каф. Информационных технологий, ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, Россия, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, Эл. почта: solvitali@mail.ru

I.A. SUTORIKHIN, V.A. SOLOVIEV

INSTRUMENTATION COMPLEX FOR MONITORING HYDROPHYSICAL PARAMETERS OF FRESHWATER PONDS

The article describes an instrument complex for monitoring hydrophysical parameters of freshwater reservoirs. Structural diagrams of the measuring devices of the complex are provided, and their operating principles are described. The article presents the results of modeling the measured values of temperature, speed and direction of currents at various depths of sections of the Teletskoye Lake water area in the summer of 2024.

Keywords: spectral underwater illumination, speed and direction of currents, temperature, measuring complex, freshwater reservoirs.

REFERENCES

1. Pokazeev K.V., Filatov N.N. Hydrophysics and ecology of lakes. Hydrophysics. Moscow. Faculty of Physics, Moscow State University. 2002. Vol. 1. 276 p.
2. Sutorikhin I.A., Krivobokov D.E., Soloviev V.A., Kamenev A.R. Method and device for measuring the distribution of spectral solar illumination in the photic layer of ponds // Patent No. 2817043 C1 Russia, MPK G01N 21/59.: No. 2022130488: publ. 09.04.2024 (in Russian).

3. Sutorikhin I.A., Soloviev V.A., Krivobokov D.E. Measuring complex for assessing spectral underwater illumination at different depths of ponds. *News of the Altai State University*. 2024. No. 4(138). P. 42-48. DOI 10.14258/izvasu(2024)4-05.
4. Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Litvinenko S.A. and others. Hydrophysical characteristics of Lake Manzherokskoye after dredging. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024. Vol. 17. No. 3. P. 115-126. DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-10.

Igor A. Sutorikhin

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Radiophysics and Theoretical Physics, Altai State University, 656049, Russia, Barnaul, Krasnoarmeysky Ave., 90, Chief Researcher of the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute of Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 656038, Russia, Barnaul, Molodezhnaya St., 1, E-mail: sia@iwep.ru

Vitaly A. Soloviev

Senior Lecturer, Department of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University, 656038, Russia, Barnaul, Lenin Ave, 46, E-mail: solvitali@mail.ru

МЕТОДЫ РЕПЕТИЦИИ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ

В статье анализируются подготовительные работы, обеспечивающие минимизацию риска неудачного запуска ERP-системы. Описывается типовой жизненный цикл ERP-системы, состоящий из предпроектного обследования, проекта внедрения и также активностей пост-имплементации. Проводится обзор наиболее используемых методологий внедрения комплексных программных продуктов: 1С: ТKB и ADM. Рассматриваются инициативы предпроектной имплементации, а также этапов анализа, проектирования, реализации, подготовки к переходу, опытной и опытно-промышленной эксплуатации, позволяющие отретепитировать выполнение наиболее критичных проектных задач и снижающие вероятность провала продуктивного старта программной системы. Определяется область применения выявленных способов репетиции внедрения информационных систем для мелких, средних и крупномасштабных IT-проектов.

Ключевые слова: *корпоративная информационная система, КИС, ERP-система, 1С ТKB, AMD.*

Введение

Процесс неизбежного перехода на отечественные программные продукты как государственными, так и частными предприятиями порождает новые тенденции на рынке потребителей программного обеспечения. Становится очевидным, что импортозамещение приобретает не разовый и мнимый, а долгосрочный характер: обратного пути к использованию западных программных продуктов не ожидается, а если он и будет, то немногие смогут себе это позволить [1]. Важность поддержания критической информационной инфраструктуры и развития отечественных программных решений закрепляется законодательно, кроме того, прослеживается постепенное смещение акцента от глобального программного рынка, к реализации собственных программных разработок не только в России [2], но и в мире в целом.

В первенстве российского рынка программных продуктов ожидаемо лидирует компания 1С, предлагающая множество решений для малого, среднего и крупного бизнеса. Переход с западных приложений различных классов автоматизации от SAP, Oracle и Microsoft преимущественно осуществляется на такие решения, как: 1С: ERP, 1С: Бухгалтерия предприятия, 1С: Зарплата и управление персоналом, 1С: Управление нормативно-справочной информацией, 1С: Аналитика, а также 1С: Документооборот, где последний продукт приобрел и продолжает наращивать популярность. Если раньше проекты имплементации SAP-решений носили массовый характер, стоимость их внедрения доходила до миллиардов рублей, а сроки уходили далеко за горизонт 1-1.5 лет, то сейчас ситуация меняется. Проекты внедрения российских программных продуктов в том числе в ходе импортозамещения ведутся довольно осторожно и преимущественно итеративно.

Прослеживается ситуация имплементации именно тех программных решений, которые несут конкурентные преимущества за разумные финансовые вложения при условии минимизации возможных рисков неуспешного продуктивного запуска информационной системы. Возникает закономерный вопрос: как соблюсти разумный баланс между стоимостью, сроками и качеством внедрения? Несомненно, низкая стоимость имеет важное значение, но это не всегда показатель того, что программное обеспечение будет имплементировано в обговоренные сроки, а результат устроит конечных бизнес-пользователей. Последнее возвращает нас к теме репетиций, имитирующих реальные проектные активности на всех этапах жизненного цикла программных систем.

Цель текущей работы состоит в анализе методов и подходов, позволяющих отретепитировать ключевые проектные задачи, минимизируя при этом вероятность неудачного запуска внедряемого программного продукта. Достижение данной цели потребует решения следующих задач:

- обзор жизненного цикла программного обеспечения;
- анализ типовых методологий внедрения ERP-систем;
- рассмотрение способов и методов репетиции внедрения программных решений.

Наиболее показательным термином, описывающим работу над программным продуктом, является жизненный цикл программного обеспечения.

Определение 1. Жизненный цикл программного продукта – это совокупность этапов, через которые проходит программное обеспечение от идеи в его создании, проектировании и до момента вывода его из продуктивной эксплуатации [3].

Согласно работе [4], жизненный цикл корпоративных информационных систем представляется не линейно, а спиралевидно, то есть как такового отказа от программного обеспечения не происходит, выполняется его замена на новую и более совершенную версию. Следуя [4-5], жизненный цикл ERP-систем представим следующими этапами работ:

- активности предпроекта внедрения: бизнес-кейс; проведение тендера; заключение договора на внедрение;
- проект имплементации: подготовка; анализ; проектирование; реализация; тестирование; переход к промышленной эксплуатации; гиперподдержка промышленной эксплуатации;
- задачи после внедрения: поддержка промышленной эксплуатации; прекращение применения,

где содержание проекта имплементации может различаться в зависимости от методологии внедрения. Так, два наиболее популярные метода имплементации ERP-систем: 1C: ТKB и ADM, включают отличные друг от друга этапы, хотя понятийно они схожи (рис. 1) [6]. Введем следующий важный термин.

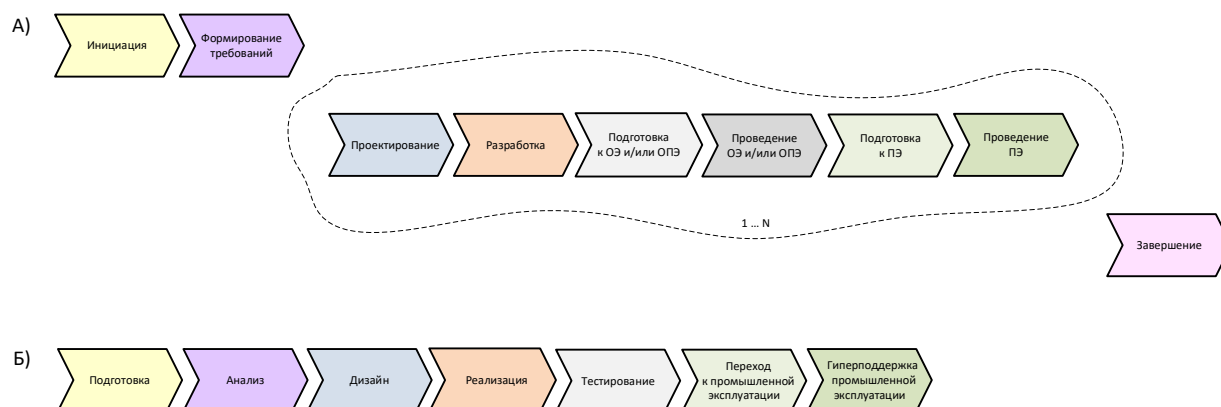


Рис. 1. Этапы внедрения ERP-систем согласно:

а) спиралевидной методологии 1C: Технология корпоративного внедрения;

б) каскадному методу ADM

Определение 2. Репетиция – форма подготовительной работы, направленная на повторение активностей для отлаживания коллективного взаимодействия и их последующего исполнения.

Репетиция может затрагивать как отдельные технические задачи, так и целые этапы работ жизненного цикла ERP-системы. Наибольший интерес с точки зрения репетиции представляют предпроектные задачи и активности имплементации программного решения, направленные на внедрение программного продукта. Репетиция позволяет членам проектной команды подготовиться к запуску информационной системы путем предварительного «тестового» выполнения наиболее критичных задач. Таблица ниже демонстрирует типовые активности репетиции предпроектного обследования и имплементации ERP-систем (табл.).

Таблица

Способы и методы репетиции внедрения ERP-систем

Тип проекта	Этап	Источник	Способ репетиции	Задача репетиции
Предпроект внедрения	Все этапы	Жизненный цикл ПО	Проведение предпроектного обследования	Расчет предварительной стоимости внедрения, формирование ТО-ВЕ архитектуры решения, подготовка дорожной карты имплементации
Проект имплементации	Анализ, проектирование	ADM, 1C: ТKB	Подготовка демо-базы или программного прототипа	Показ работоспособного программного продукта для начального знакомства пользователей с ним
	Реализация	ADM, 1C: ТKB	Показ ключевых результатов модульного теста заказчику	
	Реализация	ADM, 1C: ТKB	Последовательное испытание продукта согласно V-модели разработки через тестирование	Обучение ключевых пользователей работе с программной системой для последующего продуктивного запуска
	Реализация	ADM, 1C: ТKB	Проведение тестовых волн миграции данных	Итеративная процедура тестовой миграции основных и переменных данных,

Тип проекта	Этап	Источник	Способ репетиции	Задача репетиции
				позволяющая подготовиться к продуктивной миграции
	Реализация	ADM	Выполнение тестовых волн технического катювера	Итеративный подход к подготовке продуктивной программной системы
	Подготовка к переходу	ADM	Репетиция бизнес-катювера	Моделирование ситуации работы компании на дату выключения «старого» программного решения и запуска нового приложения
	Опытная эксплуатация	1С: ТKB	Имитация работы в продуктивной системе на ограниченном наборе данных	Моделирование работы сотрудников компании после продуктивного запуска программного решения
	Опытно-промышленная эксплуатация	1С: ТKB	Работа в продуктивной среде с параллельным вводом данных в историческую систему	Работа сотрудников компании в режиме реального времени в новом программном решении с одновременным отражением процессов в «старой» программе

Рассмотрим более подробно содержание таблицы, принимая во внимание то, что репетиция по аналогии с теорией корпоративных информационных систем [4] направлена в первую очередь на минимизацию рисков:

- начнем с предпроектного обследования. Предпроект внедрения позволяет выполнить предварительный анализ бизнес-требований, предъявляемых к программной системе, выбрать конкретное программное обеспечение для развертывания, оценить сроки и стоимость проекта имплементации, составив соответствующие планы-графики внедрения и требуемых человеческих ресурсов [4-5]. Фактически предпроектное обследование представляет собой репетицию будущего проекта имплементации с той лишь разницей, что этапы от проектирования до промышленной эксплуатации не ведутся. Игнорирование предпроекта чревато недооценкой сроков, стоимости и трудозатрат внедрения ERP-системы;
- подготовка демонстрационной базы позволяет вести более качественный сбор бизнес-требований к программному продукту: показ прототипа обеспечивает легкую идентификацию потребностей пользователей [7]. Одновременно со сбором требований осуществляется первичное знакомство ключевых пользователей с будущим приложением. Следующий этап работ, завершение функционального тестирования, позволяет закрепить полученные знания пользователей, так как ведется демонстрация ключевых результатов работы программного продукта сотрудникам заказчика [8]. Цель репетиции в контексте упомянутых двух задач состоит в наискорейшем показе и обучении пользователей внедряемому продукту;
- показ и принятие финального продукта заказчику/-ом ведется итеративно: применяется V-модель разработки через тестирование. Данная модель описывает порядок испытания программного решения и вовлечение в его тестирование различных групп пользователей. Так, функциональный тест проводится техническими специалистами, в интеграционное тестирование частично вовлекаются ключевые пользователи и, наконец, приемочный тест в формате непрерывного испытания осуществляется исключительно заказчиком [8]. В данном случае репетиция состоит из многократных проверок работоспособности продукта, проводимых до момента его продуктивного запуска;
- основной сложностью миграции данных является то, что процесс переноса информации включает в себя несколько шагов: очистку, выгрузку, трансформацию, загрузку и финальную валидацию, за каждый из которых отвечают разные ответственные как со стороны исполнителя, так и заказчика. Репетиция, проводимая в формате волн миграции, позволяет планомерно увеличивать объем мигрируемых тестовых данных (от 0% до продуктивных 100%), а также постепенно вовлечь в их обработку всех сотрудников [9]. Положительный эффект достигается за счет постепенного выявления ошибок миграции и знакомства всех участников с подходом к переносу информации;
- под техническим катювером или планом технического перехода, подразумевают список задач, выполнение которых ведется в продуктивной среде, чтобы заставить программный продукт работать в режиме реального времени [10]. Примерами задач технического катювера служат: перенос программ в продуктивную среду, планирование и запуск фоновых задач, присвоение прав и ролей конечным пользователям и др. Тестовые волны технического катювера по смыслу сопоставимы с тестовой миграцией данных и позволяют многократно отрепе-

тировать подготовку ИТ-системы перед проведением функционального, интеграционного и приемочного тестирований. Финальная настройка системы ведется в контексте продуктивного технического катовера;

- бизнес-катовер обеспечивает планомерное завершение бизнес-процессов в исторической системе и продуктивный запуск бизнес-операций во внедряемом программном решении. Чаще всего переход к использованию нового приложения требует миграции транзакционных данных, которые невозможно перенести заранее, последнее порождает блекаут компании на определенный срок [11]. Репетиция катовера подразумевает имитацию остановки работы предприятия, миграцию необходимых данных и эмуляцию запуска первых бизнес-операций. Данная активность позволяет наладить коммуникацию между множеством стейкхолдеров, минимизируя или исключая при этом период блекаута;
- довольно часто требуется проверить, действительно ли конечные пользователи смогут полноценно работать с новым внедряемым решением. В подобных случаях используются два режима имитации. Режим опытной эксплуатации обеспечивает моделирование реальной работы пользователей за ограниченный период, например, за один отчетный месяц, в рамках которого необходимо ввести все первичные документы и выполнить прочие бизнес-активности в программной системе [12]. Режим, опытно-промышленной эксплуатации подразумевает параллельную работу в двух программных системах: «старой» и новой. Данные дублируются в обеих системах для проверки их соответствия за отчетный период и возможности отката к использованию «старого» решения, если что-то пойдет не так.

На практике предпроектное обследование, тестовые волны технического катовера, а также репетиция бизнес-катовера преимущественно ведутся в крупномасштабных проектах внедрения ERP-систем. Проведение опытной и опытно-промышленной эксплуатаций целесообразно в проектах, которым свойственны высокие риски неспособности пользователей быстро освоить новый программный продукт. Активности по демонстрации демо-базы и ключевых итогов функционального теста заказчику, использованию итеративной процедуры тестирования согласно V-модели, а также проведению тестовых волн миграции данных характерны для большинства ИТ-проектов.

Заключение

В заключении хочется отметить, что репетиция играет важную роль в ходе внедрения корпоративных информационных систем, снижая риск неудачного запуска программного решения с самых начальных этапов его жизненного цикла. Проведение репетиции путем предпроектного обследования формирует образ будущей программной системы, позволяет оценить ключевые параметры проекта имплементации. Немаловажно то, что именно здесь определяется способ запуска программного решения: метод большого взрыва или франчайзинговая стратегия, что влияет на стоимость внедрения. Последующие репетиции посредством миграции данных, тестирования, технического и бизнес катоверов, а также имитации работы пользователей направлены на снижение завышенных ожиданий пользователей от системы. Игнорирование активностей репетиции может привести к перезапуску всего проекта имплементации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Катасонова Н. С. Метод большого взрыва и франчайзинговая стратегия для внедрения и импортозамещения корпоративных информационных систем // Корпоративные информационные системы. 2023. №3 (23). С. 1-11.
2. Указ Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» №309 от 07.05.2024.
3. Остроух А. В., Суркова Н. Е. Проектирование информационных систем. М.: Лань, 2019. 164 с.
4. Stepanov D. Yu. The lifecycle of corporate information systems // Proceedings of 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. 2024. P. 90-94.
5. Степанов Д. Ю. Жизненный цикл корпоративных информационных систем: от бизнес-кейса до прекращения промышленной эксплуатации (часть 1) // Корпоративные информационные системы. 2023. № 4 (24). С. 16-25.
6. Степанов Д. Ю. Жизненный цикл проекта внедрения ERP-системы на примере коробочных SAP и 1C решений, а также кастомных разработок [Электронный ресурс] // ХАБР страница компании Аксеникс. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/axenix/articles/799333/>.
7. Терентьев И. М. Стратегия анализа в проектах внедрения ERP-систем // Корпоративные информационные системы. 2018. № 2. С. 23-29.
8. Терентьев И. М. Стратегия тестирования в проектах имплементации ERP-систем // Корпоративные информационные системы. 2018. № 3. С. 39-45.
9. Грекул В. И. Проектирование информационных систем. М.: Юрайт, 2023. 385 с.
10. Nageldinger G. A framework for cutover management // PeerJ computer science. 2015. DOI: 10.7717/peerj-cs.29.

11. Mago S. SAP business transformation: steps for effective cutover and data migration // International journal of computer trends and technology. 2024. Vol. 72, № 8. P. 221-227.
12. Бобровников А.Э. Введение в управление проектами внедрения ERP-систем. М.: IC-Паблишинг, 2021. 320 с.

Демьянов Никита Алексеевич
Магистр, кафедра корпоративных информационных систем; МИРЭА – Российский технологический университет; 119454, Россия, г. Москва, Вернадского пр-т, д. 78;
Тел.: +7-901-504-40-90
Эл. почта: drifter2002@mail.ru

Сорокин Михаил Михайлович
Магистр, кафедра корпоративных информационных систем; МИРЭА – Российский технологический университет; 119454, Россия, г. Москва, Вернадского пр-т, д. 78
Тел.: +7-985-269-21-36
Эл. почта: corok63mail.ru@yandex.ru

Степанов Дмитрий Юрьевич
К.т.н., доц. РТУ МИРЭА, кафедра корпоративных информационных систем; МИРЭА – Российский технологический университет; 119454, Россия, г. Москва, Вернадского пр-т, д. 78;
Тел.: +7-916-690-65-26;
Эл. почта: mail@stepanovd.com

N.A. DEMYANOV, M.M. SOROKIN, D.YU. STEPANOV

THE REHEARSAL METHODS OF ERP-SYSTEMS IMPLEMENTATION

The article has analysis of preparatory activities to minimize the risk of unsuccessful go-live of ERP-system. There is typical lifecycle of ERP-system, consisting of pre-implementation, deployment and post-implementation phases, is described. The review of most used methodologies for the implementation of software products: 1C CIT and ADM, is conducted. The initiatives of pre-implementation phase as well as stages of analysis, design, realization, preparation for transition, pilot and pilot operation, allowing to rehearse the most critical tasks and reducing the likelihood of go-live failure, are considered. The application area of the identified rehearsal methods for small, medium and large IT-projects is determined.

Keywords: corporate information system, ERP, ERP-system, 1C Corporate Implementation Technology, ADM.

REFERENCES

1. Katasonova N.S. The big bang method and franchise strategy for implementation and substitution of corporate information systems. *Corporate information systems*. 2023. №3 (23). P. 1-11 (in Russian).
2. Decree of the President of Russian Federation «On the national development goals of Russian Federation for the period up to 2030 and 2036 years» №309 dated 07.05.2024 (in Russian).
3. Ostroukh A.V., Surkova N.E. Design of information systems. Moscow. Lan publisher. 2019. 164 p. (in Russian).
4. Dmitry Yu. Stepanov. The lifecycle of corporate information systems. *Proceedings of 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*. 2024. P. 90-94.
5. Stepanov D.Yu. The lifecycle of corporate information systems: from business case to termination of usage (part 1). *Corporate information systems*. 2023. № 4 (24). P. 16-25 (in Russian).
6. Stepanov D.Yu. The lifecycle of ERP-system implementation projects by the example of SAP and 1C package solutions and custom developments [Electronic resource]. *Habr, Axenix official page*. <https://habr.com/ru/companies/axenix/articles/799333/> (in Russian).
7. Terentiev I.M. Requirement analysis in ERP-system implementation projects. *Corporate information systems*. 2018. № 2. P. 23-29 (in Russian).
8. Terentiev I.M. Testing strategy in ERP-system implementation projects. *Corporate information systems*. 2018. № 3. P. 39-45 (in Russian).
9. Grekul V.I. Design of information systems. Moscow. Urait publisher. 2023. 385 p. (in Russian).
10. Nageldinger G. A framework for cutover management. *PeerJ computer science*. 2015. DOI: 10.7717/peerj-cs.29.
11. Mago S. SAP business transformation: steps for effective cutover and data migration. *International journal of computer trends and technology*. 2024. Vol. 72, № 8. P. 221-227.
12. Bobrovnikov A.E. Introduction to ERP-system implementation project management. Moscow. IC-Publishing. 2021. 320 p. (in Russian).

Nikita A. Demyanov
Master of technical sciences; department of Corporate Information Systems; MIREA – Russian Technological University; 78, Vernadsky prosp., Moscow, Russia, 119454;
Phone: +7-901-504-40-90;
E-mail: drifter2002@mail.ru

Mikhail M. Sorokin
Master of technical sciences; department of Corporate Information Systems; MIREA – Russian Technological University; 78, Vernadsky prosp., Moscow, Russia, 119454;
Phone: +7-985-269-21-36;
E-mail: corok63mail.ru@yandex.ru

Dmitry Yu. Stepanov
PhD of technical sciences, professor assistant RTU MIREA; department of Corporate Information Systems; MIREA – Russian Technological University; 78, Vernadsky prosp., Moscow, Russia, 119454;
Phone: +7-916-690-65-26;
E-mail: mail@stepanovd.com

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ЛИСТЬЕВ ВЯЗА МЕЛКОЛИСТНОГО С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Для оценки качества окружающей среды в условиях антропогенного воздействия часто используют показатель стабильности развития как способность организмов к нормальному развитию без отклонений. Наиболее доступным способом оценки нарушения стабильности развития является метод определения флуктуирующей асимметрии билатеральных морфологических признаков животных и растений [1]. В качестве индикаторов используются фоновые, наиболее распространенные виды растений, с которых собирают листья для анализа, причем выборка должна быть не менее 100 шт. (по 10 листьев с 10 деревьев). Далее для каждого листа измеряется по 5 морфологических признаков: ширина левой и правой половинки листа, длина второй от основания листа жилки второго порядка, расстояние между основаниями и концами первой и второй жилок второго порядка, угол между главной жилкой и второй от основания жилкой второго порядка [2]. Измерения проводятся вручную с использованием линейки, циркуля и транспортира. Такие измерения имеют большую погрешность. Чтобы снизить влияние человеческого фактора, упростить работу исследователей и обеспечить воспроизводимость результатов, необходимо разработать подход, который поможет автоматизировать этот процесс. В данной работе содержится описание методики первичного анализа гербарных экземпляров вяза мелколистного для дальнейшего исследования с помощью методов компьютерного зрения, а также приводится пример её использования для листовых пластинок вяза мелколистного. Для иллюстрации работы алгоритмов также разработаны функции для их визуализации. Описаны функции для подсчета площади и поперечных размеров листовой пластинки.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, компьютерное зрение, вяз мелколистный, предобработка изображений.

Введение

На данный момент измерения морфологических признаков листовых пластинок для выявления отклонений стабильности развития производятся вручную. Проведение одного такого исследования требует существенных затрат времени, поскольку для достоверной оценки необходимо получить данные морфологических измерений в каждой исследуемой точке произрастания растений для более, чем сотни экземпляров листовых пластинок [3]. Существующие способы автоматизации этого процесса включают в себя такие программные продукты как FAST [3-4], ImageJ [5], но они не позволяют полностью автоматизировать процесс обработки листьев: все измерения и масштабирование признаков исследователь выполняет вручную, хоть и с помощью компьютера. Поэтому возникает потребность в разработке приложения, использующего различные методы компьютерного зрения для детекции листьев в пределах изображения, измерения морфологических признаков листовой пластинки и их масштабирования, а также для удобного протоколирования производимого исследования путем сведения полученных данных в таблицу. В предлагаемой работе рассмотрим принципиальную идею предлагаемого решения, после чего опишем процесс предобработки изображений с исследуемыми листьями, приведём конкретные алгоритмы и их реализацию.

Для автоматизированной обработки листьев необходимо получить их графическое представление. И сделать это доступнее всего с помощью камеры, имеющей разрешение не менее необходимого для получения изображения 2500×3500 пикселей, или сканера. Необходимо уметь оценивать масштаб листьев на исходной фотографии, чтобы после проведенных измерений, выполненных в пикселах, произвести их перевод к метрическим единицам, например, миллиметрам. В ходе выполнения использовались эталоны с размерами 1 см × 1 см. Далее производилась обработка листьев с помощью методов компьютерного зрения.

Видение автоматизации процесса исследования выглядит следующим образом:

- 1) сделать снимок и учесть масштаб листьев на исходной фотографии;
- 2) распознать листья и эталоны на снимке;
- 3) для каждого детектированного листа отсечь черешок;
- 4) выделить жилки на листьях;
- 5) измерить морфологические признаки;
- 6) масштабировать полученные данные в соответствии с пиксельным размером эталона(-ов);

7) записать полученные данные в таблицу.

В данной работе описаны: методика получения изображения с листьями, алгоритм для нахождения листьев и эталонов на снимке, один из способов нахождения и отсечения черешка листа, определение площади, поперечного и продольного размеров листовой пластинки, что примерно соответствует её длине и ширине.

Постановка задачи и метод решения

Методику получения изображения с листьями было решено выстроить следующим образом:

1. Для учета масштаба листьев на исходной фотографии разработали такой шаблон: на белом листе размера А4 в каждом из углов был напечатан эталон — чёрный квадрат размером 1 см × 1 см.

2. При размещении гербарных образцов на распечатанном шаблоне выдвинуто требование недопущения наложения листьев на эталоны и друг на друга: между ними должен быть зазор не менее 0.5 см. Также листья должны лежать внутри границ шаблона так, чтобы центральная жилка листа вяза мелколистного была максимально перпендикулярна наименьшей стороне шаблона.

При выполнении представленной работы было получено 6 сканов наборов листьев вяза мелколистного на нашем шаблоне. Представленные ниже алгоритмы корректно работают с листовыми пластинками этого растения. Также стоит отметить, что эти алгоритмы подходят для работы с отсканированными изображениями, с обработкой снимков, полученных с помощью устройств другого типа (например, с помощью фотоаппарата) могут быть сложности, поскольку пока не реализована компенсация искажений, связанных с возможным наклоном камеры и другими особенностями съемки.

Теперь рассмотрим алгоритм работы с отдельно взятым сканированным изображением с использованием языка программирования Python и библиотеки компьютерного зрения OpenCV [6]. Сначала производилась загрузка изображения в формате RGB и получение его копии в оттенках серого (рис. 1).

Вяз мелколистный

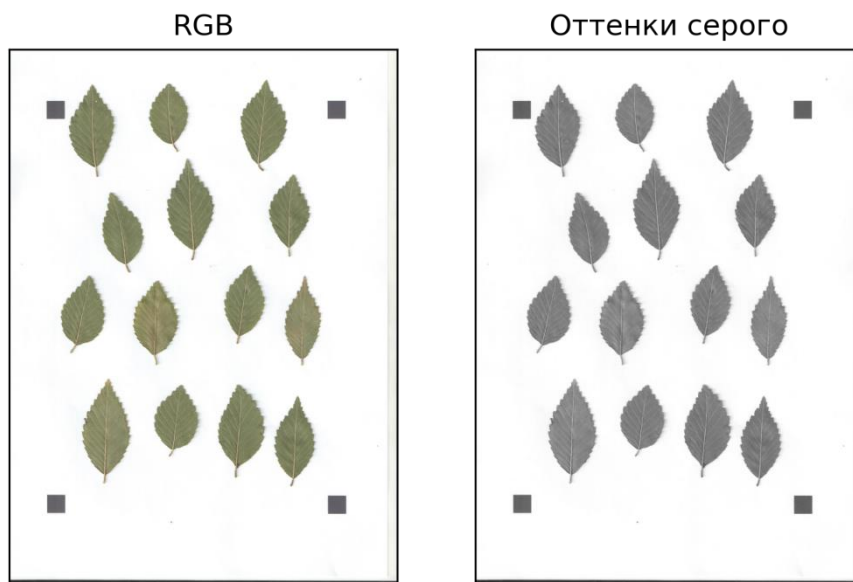


Рис. 1. Скан шаблона с размещенным на нем гербарным набором листьев вяза мелколистного и его копия в градациях серого. В углах шаблона присутствуют эталоны в виде черных квадратов

Затем выполнялись бинаризация исходного изображения и поиск контуров (см. рис. 2) с применением функции `findContours` из библиотеки OpenCV [6].

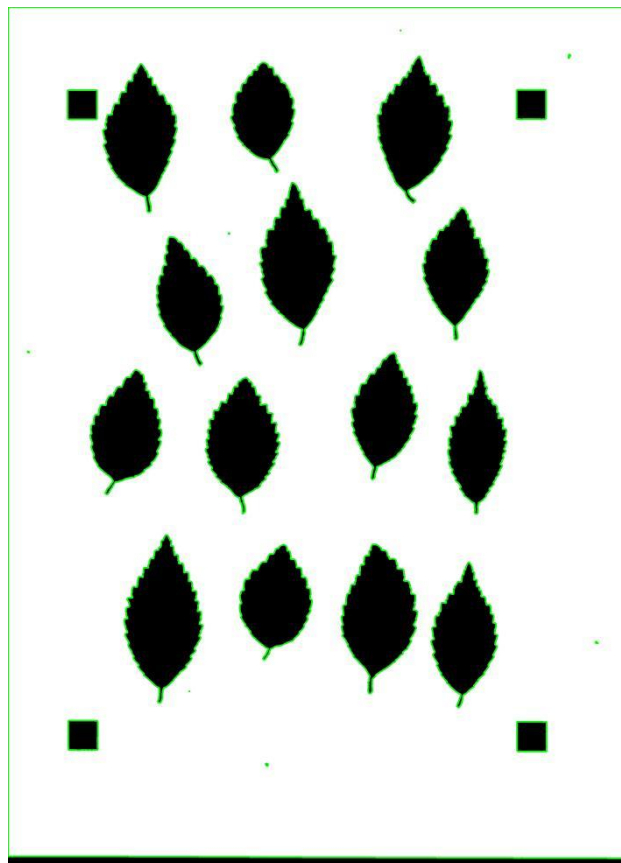


Рис. 2. Бинаризованное изображение с найденными контурами

Если встречались контуры с пустотами (например, когда внутри листа имелось отверстие), то к полученной чёрно-белой маске исходного изображения применялись операции математической морфологии: эрозии и дилатации [7] для избавления от них (см. рис. 3).

В противном случае, поскольку на фотографии изначально имеется некоторое количество шума и контуры распознаются с разрывами.

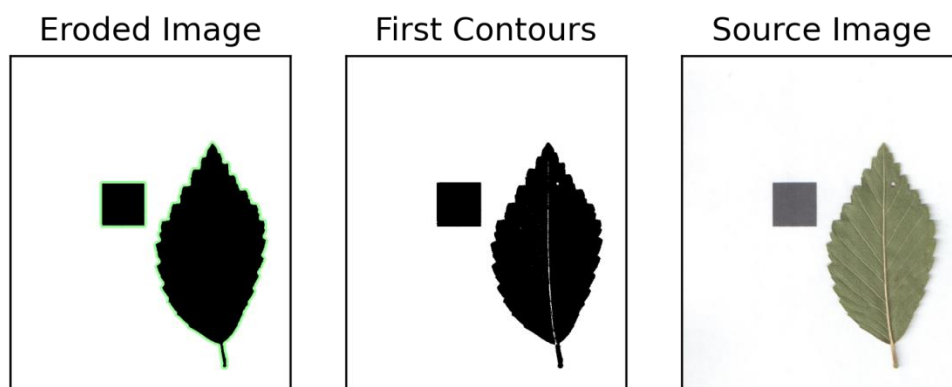


Рис. 3. Справа налево: исходное изображение листа, результат бинаризации, результат применения операций математической морфологии

На рисунке 2 можно заметить наличие мелких контуров, связанных с присутствием небольших обломков листьев, мусора и прочих артефактов. Также выделен контур, соответствующий самому шаблону. Поскольку для дальнейших вычислений требуются только сами листья и эталонные квадраты, далее выполнялась фильтрация контуров по площади, чтобы отбросить мелкие контуры, а также самый крупный контур, соответствующий шаблону. Результат этой операции вместе с добавленными центроидами полученных объектов представлен на рисунке 4.

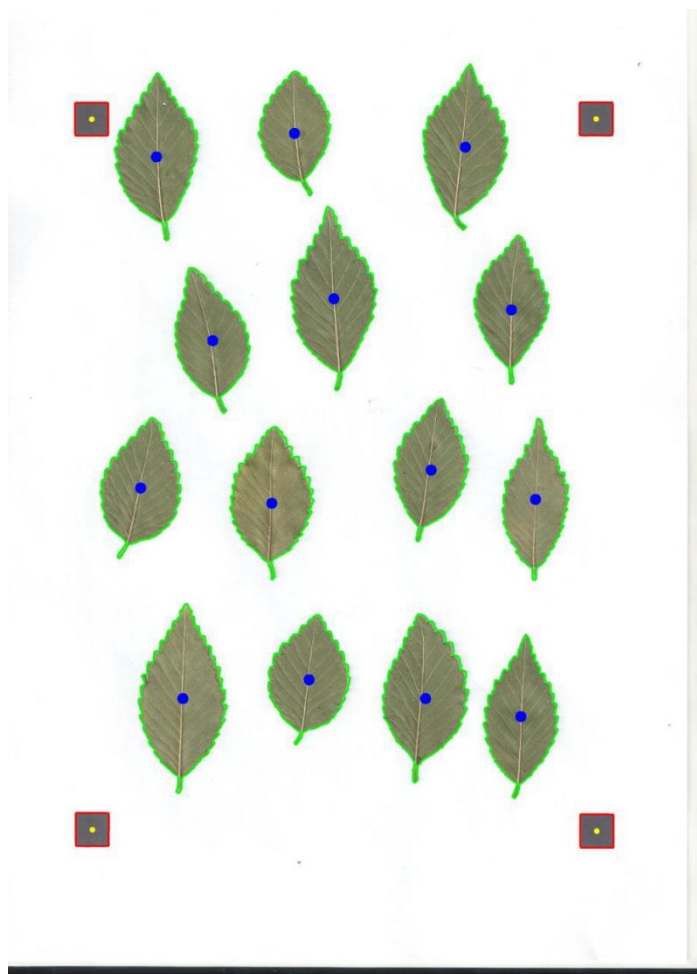


Рис. 4. Контуры объектов после фильтрации по площади

Для измерения морфологических признаков листьев исследователю было бы удобно обрабатывать листья последовательно, по рядам, назовём такой порядок следования объектов естественным. Однако функция `findContours` из `OpenCV` возвращает контуры отсортированными иначе, не в естественном порядке, поэтому нам нужно было реализовать этот функционал самостоятельно, для чего выполнялась построчная сортировка контуров листьев и контуров эталонов.

После этого легко изолировать конкретный лист в выбранном контуре в отдельное окно (см. ниже рис. 5-(а, б)), выполняя в нём необходимые исследователю операции.

Поскольку далее необходимо выполнить ряд измерений на изображении, введём коэффициент `PIXELS_PER_1mm` для масштабирования, используя информацию о том, что каждый из выделенных на рисунке 4 красным цветом эталонных квадратов имеет площадь в 100 мм^2 . Этот коэффициент отражает число пикселей на фотографии, соответствующих 1 мм:

$$\text{PIXELS_PER_1mm} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 \sqrt{S_i}$$

где S_i — площадь i -го эталонного контура.

Теперь опишем алгоритм вычисления площади и поперечных размеров листьев, и для каждого листа нужно сделать следующее:

1. Сохранить контур ограничивающего лист прямоугольника M .
2. Всё, что внутри M , но вне контура листа, закрасить в белый цвет.
3. Наложить полученный прямоугольник на квадратную матрицу

$$B = 255 A_{n \times n \times 3},$$

где $n = \max(h, w) + k$, A — трехмерный тензор, заполненный единицами, h и w — длина и ширина изображения соответственно, k — внутренний отступ от границы прямоугольника M до границы новой матрицы.

4. Убрать черешок листа с помощью операций математической морфологии [7].
5. Найти контур листа без черешка, получить для него ограничивающий прямоугольник (см. рис. 6).
6. Найти площадь контура, ширину и длину ограничивающего прямоугольника, привести их значения к миллиметрам, используя масштабирующий коэффициент *PIXELS_PER_1mm*.
7. Сохранить полученные значения в датафрейм.

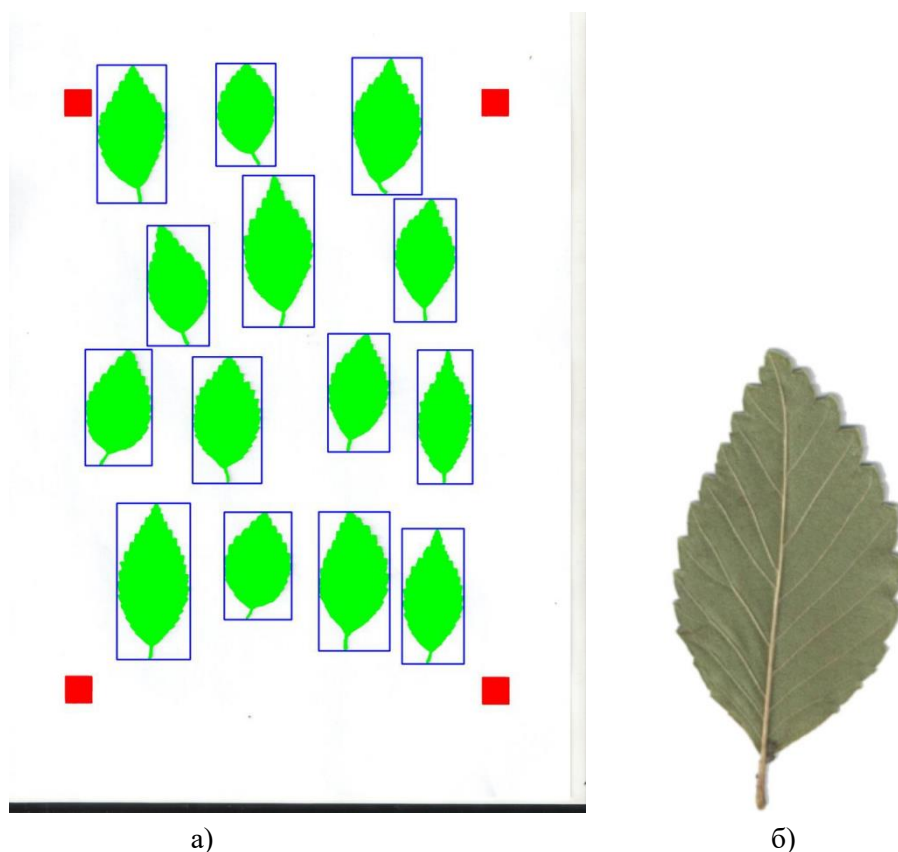


Рис. 5. Набор листьев (а), выделенных для дальнейшего исследования; изолированный с помощью выбранного контура лист (б)

Теперь, узнав ширину и длину ограничивающего прямоугольника для листа в миллиметрах (литера С на рисунке 6), мы, по сути, получили поперечные размеры листа. А площадь листа посчитать можно так: на бинаризованном изображении пиксели чёрного цвета имеют значение интенсивности, равное нулю, поэтому суммирование интенсивностей по изображению позволит получить вклад белого цвета в площадь листа.

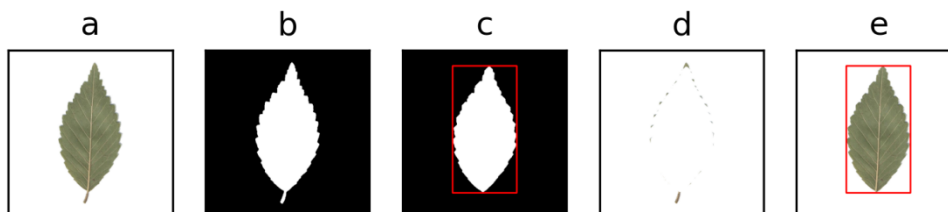


Рис. 6. Визуализация поиска ограничивающего прямоугольника для листа

В таблице приведены значения поперечных размеров и площади для всех 14 листьев, представленных на рисунке 5-а.

Таблица

Результаты вычислений морфологических признаков листьев

leaf_id	Height,mm	Width, mm	Area, mm ²
0	45.25	25.25	709.20
1	33.33	21.75	477.75
2	45.83	25.47	720.64
3	39.50	22.58	567.64
4	49.83	25.92	778.32
5	40.42	22.58	551.27
6	38.17	24.33	614.89
7	41.17	25.25	658.24
8	39.25	22.50	560.01
9	43.50	20.00	532.72
10	52.17	26.58	855.84
11	35.83	24.58	579.19
12	45.5	25.83	752.46
13	44.25	22.5	610.32

Заключение

В данной работе разработаны и реализованы алгоритмы измерения основных морфологических признаков листьев вяза мелколистного с помощью компьютерного зрения. Автоматизация этих измерительных процедур позволит уменьшить количество рутинных действий, выполняемых исследователем, и обеспечит алгоритмическую воспроизводимость результатов при повторении измерений другим исследователем. Описанные алгоритмы будут положены в основу веб-сервиса для выполнения экологических и биологических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаров В.М., Кларк Д.М. Биотест: интегральная оценка здоровья экосистем и отдельных видов. М.: Московское отделение МФ «Биотест», 1993. 68 с.
2. Методические рекомендации по выполнению оценки качества окружающей среды по состоянию живых организмов (оценка стабильности развития живых организмов по уровню флуктуирующей асимметрии морфологических структур) / сост. В.М. Захаров и др. М.: изд-во Центра экологической политики России, 2003. – 68 с.
3. FAST: Отечественное ПО для выполнения замеров с изображений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ssbg.asu.ru/fast-po-dlya-zameroi/>
4. Vaganov A.V., Krotova O.S., Khvorova L.A., (). Processing and analysis of botanical micro-and macroobjects using computer vision technologies. Journal of Physics: Conference Series 2021. Vol. 2142. Article ID 012003.
5. ImageJ is open source software for processing and analyzing scientific images [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://imagej.net/>.
6. OpenCV Tutorials [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial_root.html.
7. Morphological Transformations [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.x/d9/d61/tutorial_py_morphological_ops.html.

Тихомирова Злата Вячеславовна

Студентка Института математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, Эл. почта: zlatatikhomirova21@mail.ru

Соколова Галина Геннадьевна

Д.б.н., профессор, зав. каф. экологии, биохимии и биотехнологии, ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, Эл. почта: sokolova-gg@mail.ru

Козлов Денис Юрьевич

К.ф.-м.н., доц., зав. каф. информатики, ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, ORCID 0000-0002-7016-5623 Эл. почта: dyk.jb@yandex.ru

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MEASURING MORPHOLOGICAL FEATURES OF SMALL-LEAVED ELM LEAVES USING COMPUTER VISION

To assess the quality of the environment under conditions of anthropogenic impact, the indicator of developmental stability is often used as the ability of organisms to develop normally without deviations. The most accessible way to assess developmental instability is the method of determining the fluctuating asymmetry of bilateral morphological features of animals and plants [1]. Background, the most common plant species from which leaves are collected for analysis, are used as indicators, and the sample should be at least 100 pieces. (10 leaves from 10 trees). Next, 5 morphological features are measured for each leaf: the width of the left and right halves of the leaf, the length of the second vein of the second order from the base of the leaf, the distance between the bases and ends of the first and second veins of the second order, the angle between the main vein and the second vein of the second order from the base [2]. Measurements are carried out manually using a ruler, a circular and a protractor. Such measurements have a large margin of error. In order to reduce the impact of the human factor, simplify the work of researchers and ensure reproducibility of the results, it is necessary to develop an approach that will help automate this process. This paper describes the methodology for the primary analysis of herbarium specimens of small-leaved elm for further study using computer vision methods, and also provides an example of its use for small-leaved elm leaf blades. Functions for visualizing algorithms have also been developed to illustrate how they work. Functions for calculating the area and transverse dimensions of a leaf blade are described.

Keywords: fluctuating asymmetry, computer vision, small-leaved elm, image preprocessing.

REFERENCES

1. Zakharov V.M., Clark D.M. Biotest: an integral assessment of the health of ecosystems and individual species. Moscow. Moscow Branch of the Moscow Institute of Physics and Technology "Biotest". 1993. 68 p. (in Russian).
2. Methodological recommendations for the assessment of environmental quality by the state of living organisms (assessment of the stability of the development of living organisms by the level of fluctuating asymmetry of morphological structures) / comp. V.M. Zakharov et al. Moscow. Publishing house of the Center for Environmental Policy of Russia. 2003. 68 p. (in Russian).
3. FAST: Domestic software for taking measurements from images - <https://ssbg.asu.ru/fast-po-dlya-zamero-v/>
4. Vaganov A.V., Krotova O.S., Khvorova L.A., (). Processing and analysis of botanical micro- and macroobjects using computer vision technologies. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2142. Article ID 012003.
5. ImageJ is open source software for processing and analyzing scientific images - <https://imagej.net/>.
6. OpenCV Tutorials - https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial_root.html.
7. Morphological Transformations - https://docs.opencv.org/4.x/d9/d61/tutorial_py_morphological_ops.html.

Zlata V. Tikhomirova

Student of the Institute of Mathematics and Information Technologies,
Altai State University,
61, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656049,
E-mail: zlatatikhomirova21@mail.ru

Denis Yu. Kozlov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, Head of the Department
of Computer Science,
Altai State University,
61, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656049,
ORCHID 0000-0002-7016-5623
E-mail: dyk.jb@yandex.ru

Galina G. Sokolova

Doctor of Biological Sciences, Professor,
Head of the Department of Ecology, Biochemistry
and Biotechnology,
Altai State University,
61, Lenin ave., Barnaul, Russia, 656049,
E-mail: sokolova-gg@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЙ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ ЧЕЛОВЕКА

Аксиография основана на применении специализированных устройств для регистрации движений височно-нижнечелюстного сустава и требует высокой точности и надежности, поэтому разработка и тестирование устройств для ее реализации являются важнейшими этапами, обеспечивающими достоверность получаемых данных. В данной статье обсуждаются возможности современных методов диагностики функциональных нарушений височно-нижнечелюстного сустава путем измерения основных параметров движения нижней челюсти. Описываются примеры цифровой аксиографии с помощью программы компьютерного зрения в лабораторном практикуме при подготовке медицинских физиков. Приводятся результаты цифровой аксиографии при проведении измерения основных параметров движения нижней челюсти.

Ключевые слова: технология компьютерного зрения, параметры движения нижней челюсти, диагностика височно-нижнечелюстного сустава, цифровая аксиография.

Введение

Цифровизация лабораторного эксперимента позволяет обеспечивать формирование системы практических умений студентов по использованию современных научных технологий не только при выполнении физического практикума, но и для решения широкого спектра задач при подготовке медицинских физиков в области эксплуатации медицинского оборудования и аппаратуры [1, с. 152]. Цифровая установка для компьютерной стабилотрии на базе микроконтроллера ATmega328 является одним из примеров выпускных квалификационных работ студентов [2].

Как и в случае стабилотрии, аксиография позволяет получить индивидуальные данные движения определенных суставов человека в трёхмерном пространстве для анализа этих движений и дальнейшего планирования лечения выявленных патологий. К ранним признакам проявления дисфункции височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) в современной медицинской литературе относят девиацию нижней челюсти до 5 мм в сторону, зигзагообразное открывание рта, нарушение плавности движений, ограничение амплитуды открывания рта до 3 см, утомляемость жевательной мускулатуры и ограничение амплитуды боковых движений нижней челюсти в здоровую сторону [3]. Для диагностики нарушений функционирования височно-нижнечелюстного сустава студенты используют различные современные технологии, включая датчики и видеозаписи, которые фиксируют перемещения, углы, скорости и другие параметры движения нижней челюсти. Затем полученные данные обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения, которое позволяет визуализировать и анализировать динамику движений.

Традиционно для этой цели используют механические или оптические аксиографы, которые позволяют получать точные измерения движений не только височно-нижнечелюстных суставов, но и мышечной системы, связок и зубных рядов, что очень важно для диагностики различных заболеваний и дисфункций. Например, лазерные датчики движения могут использоваться для измерения угловых и линейных перемещений нижней челюсти, что полезно при анализе открывания и закрывания рта, а также при боковых движениях челюсти. Нами были предложен и реализован метод цифровой аксиографии, основанный на технологии компьютерного зрения для фиксации характера движения нижней челюсти по видеозаписи пациента, который обеспечивает точность функциональной диагностики височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС).

Разработка программы для регистрации движений ВНЧС на основе компьютерного зрения

Височно-нижнечелюстной сустав (ВНЧС) имеет три степени свободы, что позволяет ему выполнять сложные и разнообразные движения, необходимые для нормального функционирования. Вращение вокруг вертикальной оси позволяет нижней челюсти поворачиваться влево и вправо, что важно для жевательных движений и артикуляции. Вращение вокруг горизонтальной оси позволяет нижней челюсти открываться и закрываться, что является основным движением при жевании и разговоре. Вращение вокруг фронтальной оси позволяет челюсти двигаться вперед и назад, что также важно для жевательной функции. Для функциональной диагностики данной системы необходимо определять обобщенные координаты –

это те параметры, которые используются для описания состояния системы с учетом ее степени свободы. Обобщенные координаты могут иметь размерность длины (метр) или угол поворота (радиан). В качестве одной из обобщенных координат нами был выбран модуль вектора r – расстояние между двумя точками на нижней челюсти человека (первая точка в области венечного отростка, вторая в области подбородочного отверстия).

При использовании видеозаписи движения височно-нижнечелюстного сустава была предварительно разработана программа, которая будет находить значение модуля Δr (изменения вектора r), и строить на основе этих данных график зависимости этого параметра от времени. Отследить изменение расстояния Δr можно визуально, работая с видеозаписями движения височно-нижнечелюстного сустава с помощью использования технологий компьютерного зрения [4].

Для определения расстояния Δr предварительно решались базовые задачи компьютерного зрения:

- удаление фона (задача пигментации/фильтрации);
- выделение объектов;
- определение характеристик объектов;
- классификация объектов;
- определение местоположение объектов.

Для нахождения модуля вектора r было необходимо, чтобы программа понимала – в каких координатах в каждый момент времени находится каждая из двух выбранных точек. Для этого было принято решение обозначить точки путем наклеивания круглых наклеек небольшого размера на лицо человека. Тогда программа могла бы находить эти точки на видео и получать их координаты.

Далее решалась одна из основных задач компьютерного зрения – это выделение необходимых объектов с помощью цвета. Далее решалась одна из основных задач компьютерного зрения – это выделение необходимых объектов с помощью цвета. Выбор был между цветами несвойственными коже лица человека: зеленым и фиолетовым. В итоге после апробации программы точки на нижней челюсти сделали зелёными, потому что зелёные пиксели легче задать на цветовом пространстве (рис. 1).

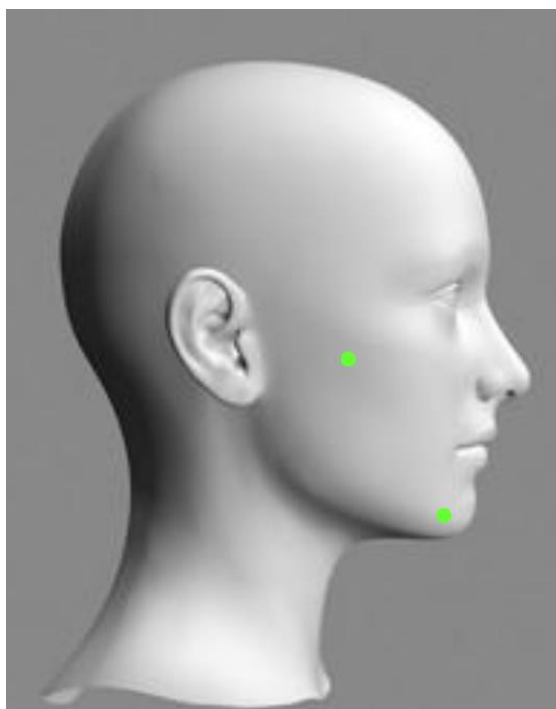


Рис. 1. Выделение необходимых объектов на нижней челюсти с помощью зеленого цвета

Автоматический анализ движений нижней челюсти может быть реализован с помощью различных методов CV (табл. 1):

Таблица 1

Классические методы CV	Современные методы CV	Методы CV, используемые в программе
1. Предварительная обработка изображений • Фильтрация • Морфологические операции • Гистограммная обработка 2. Детектирование границ и углов • Операторы градиентов: • Детекторы углов: 3. Выделение и сопоставление особенностей • Локальные дескрипторы • Методы сопоставления 4. Сегментация изображений • Пороговая обработка • Краевые методы • Графовые методы 5. Детектирование объектов • Каскады Хаара • HOG + SVM • Текстурные методы 6. 3D-реконструкция и стереозрение • Стереосоответствие • Структура из движения	1. Сверточные нейронные сети (CNN, ConvNets) 2. Детекция объектов (Object Detection) • Двухэтапные детекторы • Одноэтапные детекторы • Трансформеры в детекции 3. Сегментация изображений (Image Segmentation) • Семантическая сегментация • Instance Segmentation 4. Трансформеры в CV 5. Генеративные модели 6. 3D Computer Vision 7. Мультимодальные модели	1. Захват и чтение видео 2. Цветовая сегментация (Color Segmentation) 3. Поиск контуров (Contour Detection) 4. Анализ геометрии контуров 5. Калибровка масштаба

Пример цветовой сегментации в HSV-пространстве для выделения зеленого цвета на изображении

```
hsv_image = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
lower_green = np.array([40, 40, 40])
upper_green = np.array([80, 255, 255])
mask = cv2.inRange(hsv_image, lower_green, upper_green)
```

При разработке и апробации программы для цифровой аксиографии на основе компьютерного зрения для фиксации характера движения нижней челюсти был решён ряд проблем, представленных в таблице 2.

Таблица 2

Перечень проблем, возникших при разработке программы для цифровой аксиографии

Проблема	Решение проблемы
Выбор библиотеки для работы с компьютерным зрением	Анализ представленных функций и выбор наиболее подходящей библиотеки (OpenCV)
Работа с видео	Разбиение видео на кадры и обработка каждого кадра как изображения
Конвертация пикселей в миллиметры	Через задачу точкам размера в 1 см и вычисления занимаемых ими площади по пикселям
Нахождение оптимального положения нижней точки	Нижняя точка должна крепиться в области подбородочного отверстия
Как сделать точку	Круглой наклейкой
Выбор цвета для точек	Выбор цвета нехарактерного для цвета кожи человека (зеленый)
Определение специальных требований для видео	Человек должен быть снят в профиль, лицо должно занимать большую часть кадра и точки должны быть отчетливо

В качестве языка программирования был выбран Python, потому что он поддерживает множество библиотек, имеет относительно легкий синтаксис и оптимальную производительность. Для работы с компьютерным зрением была выбрана библиотека OpenCV, для работы с массивами NumPy и для построения графиков – Matplotlib. Были сложности с выбором библиотеки для работы с компьютерным зрением: выбор был между OpenCV и Kornia, но после анализа библиотек, выбор был сделан в пользу более функциональной и оптимизированной OpenCV.

Таким образом, программа цифровой аксиографии на основе технологии компьютерного зрения позволяет диагностировать состояние височно-нижнечелюстного сустава с помощью соответствующего алгоритма действий:

1. На вход программы поступает видео, на котором человек, на чьем лице отмечены две зеленые точки, должен жевать продукт определенной жёсткости.
2. Программа находит координаты каждой зелёной точки для определённого момента времени (кадра или микросекунды) и расстояние между ними.
3. Программа на основе полученных данных строит графики модуля вектора r , а также его первой и второй производных по времени $r(t)$, $v(t)$ и $a(t)$.

Эти графики являются необходимой базой для дальнейшей интерпретации результатов диагностики функционирования нижней челюсти (рис. 3).

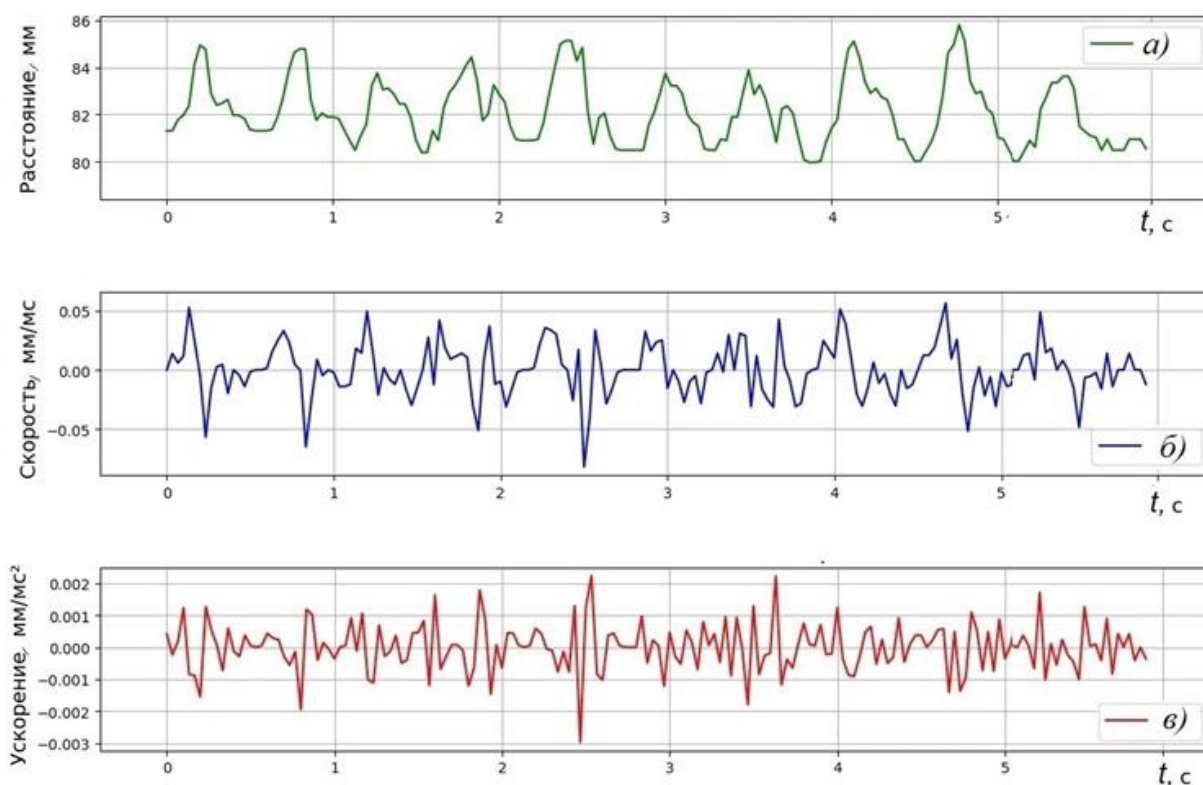


Рис. 3. Пример построения программой цифровой аксиографии графиков зависимости параметров нижней точки, расположенной в области подбородочного отверстия, от времени:
а) расстояние $r(t)$; б) линейная скорость $v(t)$; в) тангенциальное ускорение $a(t)$

Заключение

Полученные результаты цифровой аксиографии с помощью программы для регистрации движений височно-нижнечелюстного сустава на основе компьютерного зрения позволяет фиксировать не только фазы движения нижней челюсти, но и наблюдать во время периода жевания различную длительность, характер, крутизну, регулярность волн.

График зависимости расстояния от времени (рис. 3, а) показывает, что при жевании пищи у пациента четко фиксируются такие фазы движения челюсти, как:

- полное смыкание челюстей, которое соответствует минимальному уровню аксиограммы;

- восходящая часть волны (опускание челюсти);
- нисходящая часть волны (подъем челюсти).

Максимумы на графиках зависимости скорости и ускорения от времени (рис. 3, б-в) позволяют фиксировать увеличение жевательного давления и выборе жевательным аппаратом нужного для дробления пищи давления.

Анализ графиков, представленных на рисунке 3, позволяет быстро установить характер и особенности открытия и закрытия челюсти в контексте дисфункции височно-нижнечелюстного сустава не только на приеме у врача, но и при передаче необходимой информации на любое расстояние. После сбора и анализа достаточного количества данных можно обучить искусственный интеллект, который на основе указанных графиков будет ставить предварительный диагноз. Приведенный пример программной реализации функциональной диагностики состояния височно-нижнечелюстного сустава с учётом выявленных возможностей подходит и для телемедицины – одного из наиболее быстро растущего сегмента здравоохранения в мире.

Разработанная программа для аксиографии на основе компьютерного зрения демонстрирует значительный потенциал в области телемедицины и для дистанционной и очной диагностики патологий височно-нижнечелюстного сустава. Использование современных технологий обработки изображений и видеоанализа позволило создать доступную и эффективную альтернативу традиционным методам. Дальнейшее развитие и внедрение искусственного интеллекта открывают дополнительные возможности для автоматизации, ускорения и улучшения диагностических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шимко Е.А., Утемесов Р.М., Козлов Д.Ю. Образовательные возможности цифровой лаборатории Vernier при подготовке медицинских физиков // Современное педагогическое образование, 2019. С.152-156.
2. Utemesov R., Shimko E. Digital Device for the Computer Stabilometry Based on the Microcontroller ATmega328 // Communications in Computer and Information Science, 2022. Vol. 1526. P. 43-54.
3. Пономарев А.В. Диагностика, оценка эффективности лечения и прогнозирования дисфункции височно-нижнечелюстного сустава: дис. ... докт. медиц. наук. Самара, 2018. Режим доступа: <http://www.samsmu.ru/files/referats/2018/ponomarev/dissertation.PDF>
4. Кофанов П.И., Тупикин Д.А., Звягина Е.А. Компьютерное зрение, определение изменений посредством компьютерного зрения (на примере создания лазерного тира) // Мехатроника, автоматика и робототехника, 2019. № 3. С. 158-160.
5. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1986. 400 с.

Шимко Елена Анатольевна
Доцент кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет
656038, Россия, г. Барнаул, Ленина пр-т, д. 60, кв.36
Тел.: +7-913-278-00-22
Эл. почта: eashimko65@gmail.com

Утемесов Равиль Муратович
Доцент кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет
656008, Россия, г. Барнаул, ул. Анатолия, д. 220, кв.45
Тел.: +7-960-944-65-45
Эл. почта: z

Бочкарева Елизавета Дмитриевна
Студент 2 курса бакалавриата ИЦТЭФ АлтГУ
Алтайский государственный университет
656049, Барнаул, пр. Ленина, 61
Тел.: +7-913-693-45-05
Эл. почта: bochcarevaelizaveta@gmail.com

E.A. SHIMKO, R.M. UTEMESOV, E.D. BOCHKAREVA

APPLICATION OF THE COMPUTER VISION TECHNOLOGIES FOR AUTOMATIC ANALYSIS OF HUMAN MANDIBULAR MOVEMENTS

Axiography is based on the use of specialized devices for recording movements of the temporomandibular joint and requires high accuracy and reliability, therefore, the development and testing of devices for its implementation are the most important stages ensuring the reliability of the data obtained. This article discusses the possibilities of modern methods for diagnosing functional disorders of the temporomandibular joint by measuring the basic parameters of the movement of the mandible. Examples of digital axiography using a computer vision program in a laboratory practice in the training of medical physicists are described. The results of digital axiography are presented when measuring the main parameters of the lower jaw movement.

Keywords: computer vision technology, mandibular movement parameters, diagnosis of the temporomandibular joint, digital axiography.

REFERENCES

1. Shimko E.A., Utemesov R.M., Kozlov D.U. Educational opportunities of the Vernier digital laboratory in the training of medical physicists. *Modern pedagogical education*. 2019. P. 152-156.
2. Utemesov R., Shimko E. Digital Device for the Computer Stabilometry Based on the Microcontroller ATmega328. *Communications in Computer and Information Science*. 2022. Vol. 1526. P. 43-54.
3. Ponomarev A.V. Diagnosis, evaluation of the effectiveness of treatment and prognosis of temporomandibular joint dysfunction: dis. ... doct. medical sciences. Samara, 2018. Access mode: <http://www.samsmu.ru/files/referats/2018/ponomarev/dissertation.PDF>
4. Kofanov P.I., Tupikin D.A., Zvyagina E.A. Computer vision, determination of changes through computer vision (using the example of creating a laser shooting range). *Mechatronics, Automation and Robotics*. 2019. No. 3. P. 158-160.
5. Pavlidis T. Algorithms of machine graphics and image processing. *Moscow. Radio and Communications*. 1986. 400 p.

Elena A. Shimko

Associate Professor of General and Experimental Physics,
Altai State University
656038, Russia, Barnaul, Lenin Ave, 60,
ap. 36
Tel: + 7-913-278-00-22
E-mail: eashimko65@gmail.com

Ravil M. Utemesov

Associate Professor of General and Experimental Physics,
Altai State University
656008, Barnaul, Russia, Anatolia str,
220, ap. 45
Tel.: +7-960-944-65-45
E-mail: urm214@mail.ru

Elizaveta D. Bochkareva

2th year bachelor's student, IDTEP,
AltSU
Altai State University
656049, Russia, Barnaul, Lenin Ave, 61
Tel.: +7-913-693-45-05
E-mail: bochcarevaelizaveta@gmail.com

УДК 004.65

Б.Т. ТОРОБЕКОВ, Б.Б. КОШОЕВА, А.А. АЗИМОВА, А.Т. БАКАЛОВА, Г.Т. ЖАМГЫРЧИЕВА

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ВУЗА

Статья посвящена формированию системы мониторинга образовательной деятельности ВУЗов на основе информационной системы. Приведен анализ современного состояния тенденций развития и обеспечения эффективности образовательной системы. Проанализированы предпосылки реализации, характеристики и функционал системы мониторинга ВУЗов. Обосновано формирование методики мониторинга образовательного процесса ВУЗа. Разработана система оценочных критериев и показателей мониторинга с описанием их систематизации и классификации. Приведены характеристики показателей мониторинга, расчетные формулы их определения, порядок актуализации для моделирования. Предлагается применение информационной системы в мониторинге ВУЗов. Описано моделирование бизнес-процессов системы мониторинга образования ВУЗов. Приведены основные характеристики и архитектура разработанной системы, на основе которой представлены итоговые уровни мониторинга на примере двух университетов.

Ключевые слова: вуз, мониторинг, эффективность, критерии оценки, образовательный процесс, показатель, рейтинговая система, бизнес-процессы, методика, моделирование.

Введение

Современные тенденции в развитии вузов по позиционированию в мировых образовательных рейтингах, переходу на модель университетов 4.0. и развитию трансфер технологий объективно обусловили необходимость разработки и реализации в практической деятельности более современных методов и технологий управления образовательной системой на основе мониторинга.

Обеспечение эффективности деятельности ВУЗов можно представить, как функцию максимальных уровней входных, ресурсных, социальных, информационных, статусных и др. баз, а также результативности достижения целей согласно миссии, признания репутации потребителями образовательных услуг и рейтинговыми системами. В этой связи в целях для достижения динамического развития по критериям эффективности вузы предусматривают систему мер по выполнению возложенных требований и задач стратегического развития на основе мониторинга.

В настоящее время в связи с введением института аккредитации и расширением форм участия в рейтинговых системах введение мониторинга, обеспечивающего оценку количественных и качественных показателей эффективности результатов деятельности ВУЗов, приобретают практическую значимость.

Специфика задач оценки и повышения эффективности деятельности ВУЗа и его подразделений состоит в том, что они являются неформализованными. Попытки решения неформализованных задач в информационных системах высших учебных заведений предпринимались с расширением автоматизации процессов, однако, ввиду отсутствия соответствующей теоретической и методической баз, разработанных инструментальных программных средств, исследование проблем остались во многих случаях не реализованными. Поэтому разработка методики мониторинга образовательного процесса с инструментами программного обеспечения для решения неформализованных задач оценки деятельности ВУЗа на основе информационных систем (ИС) является актуальной проблемой.

Целью исследования является создание и реализация системы мониторинга, обеспечивающей получение объективных и представительных информативных данных, а также оценку эффективности результатов деятельности вузов, что в конечном итоге скажется на увеличении вклада системы высшего образования в экономическое развитие и рост общественного благосостояния в стране.

Постановка задачи исследования. Формирование системы мониторинга образования предусматривает осуществление систематического анализа и оценки образовательной деятельности на основе диагностических и оценочных процедур, сбора и обработки соответствующих данных о состоянии и использовании ресурсного, управленческого и научно-образовательного потенциала в организации образовательной деятельности, а также информационное сопровождение о достижениях результатов деятельности вуза для заинтересованных участников образовательного процесса. Множество неформализованных регуляторов и требований, сложности актуализации их критериев, потребности систематизации разрозненных по уровням управления и функционалу для реали-

зации оценочных бизнес-процессов определения результатов образовательного процесса обуславливает необходимости разработки и реализации информационной системы мониторинга ВУЗов.

Методология и методы исследования. В соответствии постановки задачи в работе использованы методы теории управления образовательной системой, статистического исследования, системного анализа, экспертной оценки, теории множеств, квалиметрии, экспериментального исследования, моделирования бизнес-процессов и программирования.

Результаты исследования и обсуждения. Мониторинг в общенаучном понимании можно представить, как деятельность, которая предусматривает наблюдение, анализ, контроль и прогнозирование, которые являются важными составляющими оценки состояния системы управления. «Мониторинг - это система сбора, обработки, хранения и распространения информации о любой системе или ее элементах, ориентированная на информационное обеспечение управления этой системой, которая позволяет судить о ее состоянии в любое время и прогнозировать ее развитие» [12, с. 165; 4, с. 110].

В наше время мониторинговые методы активно используются для оценки качества образования и его комплексных характеристик, способности субъекта или образовательной системы к развитию. Мониторинг признан важным элементом систем управления качеством образовательной деятельности учебных заведений [11, с.249].

Следует отметить, что система мониторинга образовательного процесса с формализацией оценочных показателей – это относительно новая технология в обеспечении эффективных результатов деятельности ВУЗов. С учетом приведенных требований и задач в данном исследовании системой мониторинга образовательной деятельности подразумевается совокупность взаимосвязанных оценочных процедур в установленные сроки, имеющих целью оценку индивидуальных и итоговых результатов работы ВУЗов на основе объективного информационного обеспечения.

На основе обзорных исследований и обобщения лучших практик разработана методика образовательного мониторинга, согласно которой мониторинг осуществляется применением системы оценочных показателей, сгруппированных по основным задачам обеспечения эффективности образовательного процесса. Для комплексного и объективного учета, а также полноценного охвата необходимых параметров образовательной деятельности процедурами мониторинга необходимо экспертным путем обосновать и выбрать соответствующих показателей согласно установленным критериям эффективности образовательного процесса.

Для каждого объекта мониторинга необходима разработка определенного набора критериев и показателей. Важно отметить, что, несмотря на то что инструментарий для каждого объекта индивидуален, все же они влияют друг на друга, и, соответственно, элементы показателей для этих объектов должны иметь общие составляющие.

Согласно технологии критериального оценивания результатов образовательной деятельности современное оценивание должно осуществляться с параметрами, критериями и показателями. Параметр показывает то, что подлежит оцениванию. Критерий отражает признак, по которому оценивается результат. Показатель – это частный критерий, расшифровывающий его содержание [13, с. 163].

В нашем исследовании принимается нижеследующая интерпретации понятий [9, с.123, 3. с.22].

- «Параметр» - выраженный в числовой форме показатель, который позволяет производить сравнение объектов и который применяется для оценки соответствия реального состояния объекта нормативным требованиям или критериям.

- «Критерий» - признак, на основании которого формулируется оценка качества объекта, процесса, мерило такой оценки. Это представление субъекта оценки о том, каким должен быть объект в идеале. Он рассматривается как эталон, на основе которого осуществляется оценка, сравнение результатов и должен быть выражен в тех или иных шкалах измерения. Каждый критерий включает в себя группу показателей, качественно и количественно характеризующих его.

- «Показатель» - описание некоторой характеристики объекта, которая признается существенной и актуальной в оценочной деятельности. Показатель только называет элемент образовательной системы, указывая таким образом на его важность в решении задачи. Он отражает отдельные свойства и признаки познаваемого объекта и служит средством накопления количественных и качественных данных для критериального обобщения. Каждый критерий включает в себя группу показателей, качественно и количественно характеризующих его.

Результаты мониторинга будут оцениваться индивидуальными и итоговым уровнями оценки, которые будут опираться на соответствующие критерии и показатели. При этом критерии будут раскрыты на основе системы показателей мониторинга.

Нами сформирован набор показателей мониторинга образования вузов по соответствующим критериям. По каждому критерию были сформулированы соответствующие показатели мониторинга образования. На основе экспертных оценок предлагается 6 критериев, которые характеризуются соответствующими 20 показателями мониторинга образования (табл. 1). Принятые для мониторинга показатели имеют различные единицы измерения. В нашем исследовании в соответствии с имеющимися характеристиками выбранные показатели имеют следующие единицы измерения: ед., %, кв.м. и порядковый номер.

Таблица 1.

Оценочные показатели мониторинга образования

№	Критерии обеспечения эффективности образовательного процесса	Наименование показателей	Ед. изм.
I	Обеспечение привлекательности образования для потребителей	1.1 Средний балл ОРТ, поступивших на 1 курс студентов	ед.
II	Реализация инновационных образовательных программ	2.1. Удельное количество реализуемых инновационных, высокотехнологичных и международных образовательных программ (ОП)	%
		2.2. Удельное число образовательных программ PhD	%
III	Соответствие формы и содержания образовательного процесса стандартным требованиям	3.1. Удельное число учебных дисциплин инновационного профиля (зеленая технология, экономика знаний, цифровая трансформация, умные технологии и др.)	%
		3.2. Доля штатного ППС с учеными степенями	%
		3.3. Площадь учебно-лабораторных помещений в расчете на 1 студента	кв.м
IV	Интеграция науки и образования	4.1. Удельное число исследовательских лабораторий и научных центров инновационного характера	%
		4.2. Удельный объем финансирования научных исследований в общем бюджете	%
		4.3. Число патентов и авторских свидетельств в расчете на 1 ППС в год	ед.
		4.4. Число статей, индексируемых в РИНЦ в расчете на одного ППС в год	ед.
		4.5. Число статей, индексируемых в Scopus в расчете на одного ППС в год	ед.
V	Международная интеграция	5.1. Удельное число международной мобильности студентов	%
		5.2. Доля обучающихся иностранных студентов	%
		5.3. Удельное число международной мобильности ППС	%
		5.4. Доля зарубежных профессоров, ведущих занятия и выполняющих совместную НИР	%
VI	Позиционирование образования и признание потребителей	6.1. Доля трудоустройства выпускников вуза	%
		6.2. Позиции вуза в мировых рейтинговых системах	№
		6.3. Позиции вуза в национальной рейтинговой системе	№
		6.4. Доля бизнес-процессов, управления образованием цифровыми технологиями	%
		6.5. Импакт-фактор научных журналов в РИНЦ	ед.

Показатели мониторинга принимаются в привязке к соответствующему критерию. В соответствии со спецификой критерия количества их показателей может быть разным. В нашей работе количество показателей по критериям мониторинга составляет от одного до пяти наименований. При этом минимальное число в количестве одного показателя приходится критерию «Обеспечение

привлекательности образования для потребителей». Критерий «Интеграция науки и образования» имеет наибольшее число показателей, составляющих 5 наименований.

Целевую задачу итогового уровня мониторинга формализуем в следующем виде:

$$Z_j = f \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{ij}^{\phi}}{x_{ij}^H} \right), \quad (1)$$

где Z_j – функция эффективности вузов, определяемая итоговым уровнем мониторинга;

x_{ij}^{ϕ} – фактические уровни i -показателя j -объекта мониторинга;

x_{ij}^H – нормативные стандартные уровни i -показателя j -объекта мониторинга;

$i=1, \dots, n(20)$ – количество рассматриваемых (установленных) показателей мониторинга;

$j=1, \dots, m$ – объекты мониторинга.

В соответствии с представленной целевой функцией эффективность результатов деятельности вузов по результатам мониторинга будет обеспечена при максимальных уровнях фактических значений показателей системы оценки мониторинга, соотнесенные к нормативным (стандартным) критериям.

Фактические данные показателей мониторинга образования определяются на основе отчетных данных, измерительных и расчетных процедур, а также сбора и обработки соответствующих данных. Следует учесть наличие установленных нормативных показателей, что в последующем будет использовано для сравнительных целей. Нормативные данные и их значения принимаются согласно законодательных требований Государственных образовательных стандартов, лицензирования и аккредитации образовательной системы. В случае отсутствия нормативов их заменяют фактические максимальные данные параметров на национальном уровне. Такие случаи в нашей работе имеют место по показателям среднего балла ОРТ поступивших абитуриентов, позиции вуза в рейтинговых системах и импакт-фактор журнала вуза, имеющего максимальные показатели в стране.

Использование разработанной модели мониторинга позволяет осуществлять функции анализа, оценки, выполнения текущих и стратегических задач, выявлять отстающие направления и разрабатывать рекомендации по повышению эффективности результатов образовательной деятельности вузов. В моделировании бизнес-процессов мониторинга образовательного процесса будут применяться специально разрабатываемое программное обеспечение и дополнительная бизнес-модель, что необходима для лучшего понимания бизнес-процессов и специфики мониторинга в образовании [2, с. 450; 7, с. 3398].

Программное обеспечение имеет целью обеспечить реализации и осуществления контроля всех процедур бизнес-процесса мониторинга образовательной деятельности вузов в режиме установленной программы на основе получаемых на каждом из этапов данных. По сути процессы и процедуры мониторинга обусловлены из модели жизненного цикла сбора и обработки информации. Поэтому необходимо построить функциональную систему мониторинга образования, графическое представление декомпозиции которой осуществляется на основе IDEF0 – модели.

В методологии IDEF0 основным понятием выступает декомпозиция. Декомпозиция предназначена для разбиения сложного процесса на составляющие его функции. Процесс детализации определяется самим разработчиком модели. Декомпозиция обеспечивает структурирование и представления модели системы в виде иерархической структуры отдельных диаграмм, что способствует ее разгрузке облегчению и легкому усвоению. Модель IDEF0 представляет систему как единого целого – одного функционального блока с необходимыми интерфейсными дугами. Такая диаграмма с одним функциональным блоком называется контекстной диаграммой предметной области [1, с. 76].

При проектировании информационной системы необходимо разработать ее информационную модель. Разработка информационной модели системы осуществляется методологией IDEF0, который применяется для моделирования широкого класса систем. На рисунке 1. приведена контекстная диаграмма ИС мониторинга образования вузов [1, с. 77].



Рис. 1. Контекстная диаграмма системы мониторинга образования ВУЗов

В разработанной контекстной диаграмме входными объектами являются:

- информационные данные о ВУЗе;
- информация об образовательных программах;
- база данных студентов;
- потенциал о научно-педагогических кадрах;
- обеспеченность материально-технической базой;
- выполнение программы развития ВУЗов.

Выходными объектами проектируемой системы являются:

- анализ уровней состояния обеспеченности;
- анализ выполнения нормативных данных;
- анализ соответствия стандартным параметрам;
- индивидуальные уровни мониторинга;
- итоговой показатель мониторинга ВУЗов;
- анализ оценки эффективности деятельности ВУЗов.

Регуляторами управления и координационными механизмами выступают внешние вызовы, ожидания и потребности образования, что характеризуется следующими составляющими:

- установки государственных образовательных стандартов (ГОС);
- требования потребителей образовательных услуг (ОУ);
- локальные нормативы;
- национальные и международные нормативы.

Вслед за построением функциональной модели и описанием системы в целом необходимо ее разбивать на крупные фрагменты, что отражается в функциональной декомпозиции.

Детализация разработанной контекстной диаграммы системы мониторинга вузов имеет следующие подсистемы (рис. 2.) [1, с. 79]:

- разработка и утверждение программы мониторинга;
- разработка и утверждение метода мониторинга;
- организация и проведение мониторинга;
- анализ и интерпретация результатов.

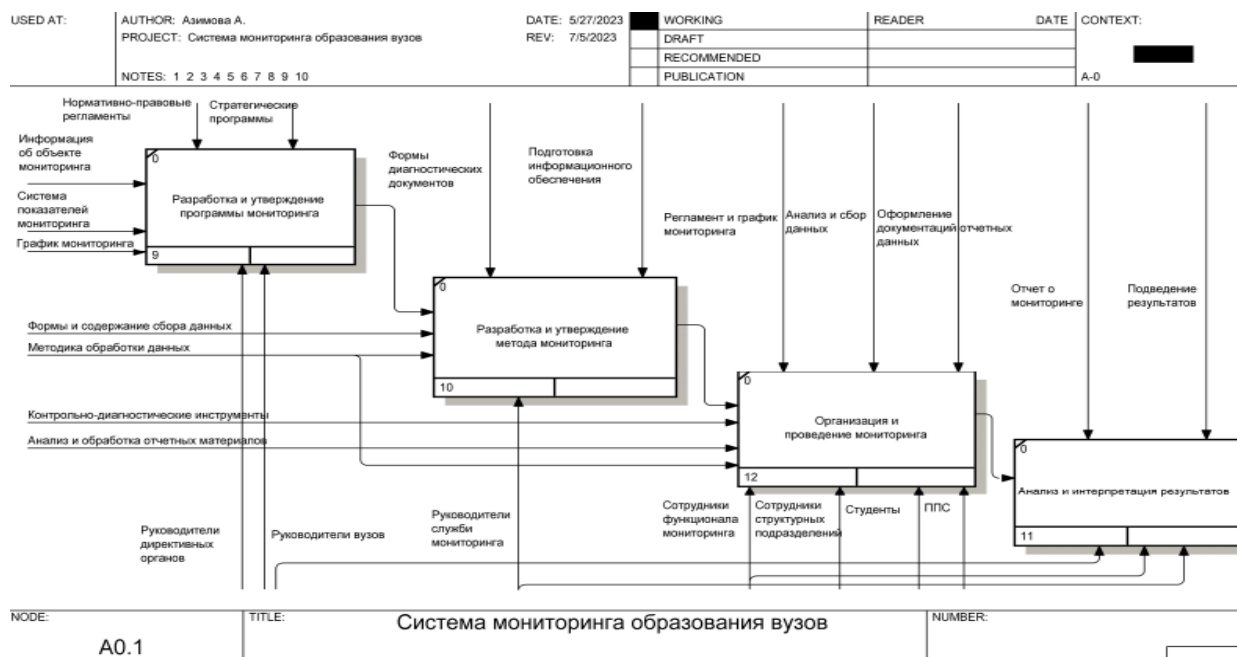


Рис. 2. Декомпозиция системы мониторинга образования ВУЗов

В дальнейшем переходим к детализации диаграммы по каждой подсистеме и построим диаграммы потоков данных (DFD). Для примера приводится описание процесса «Разработка и утверждение программы мониторинга» (рис. 3). В данной подсистеме реализуются следующие основные функции:

- определение целей, задач и регламента мониторинга;
- разработка и утверждение графика мониторинга и порядка организации;
- формирование объектов и субъектов мониторинга;
- составление и реализация программы мониторинга.

Моделирование бизнес-процессов мониторинга образования по приведенной методологии способствовали формированию обоснованных операций, определению оптимальной их последовательности, систематизации информационных потоков и нормативных ограничений в оценке функционирования деятельности вузов.

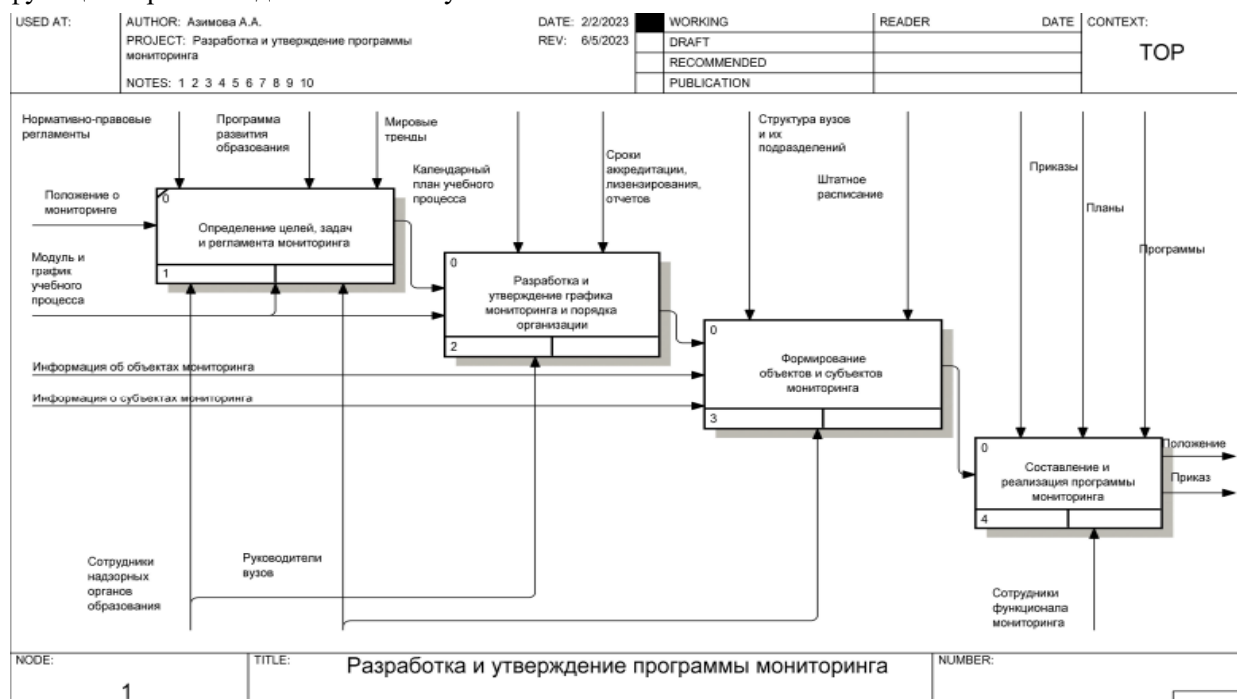


Рис. 3. Описание процесса разработка и утверждение программы мониторинга

Обобщением обзорных исследований и мировой практики по обеспечению эффективности результатов деятельности вузов разработана информационная система мониторинга образования вуза. Данная информационная система спроектирована на основе исходных и отчетных баз данных, характеризующих состояние и результатов деятельности ВУЗов за отчетный год [2, с. 548; 12, с. 13].

Разрабатываемая модель мониторинга образования имеет целью обеспечить количественную оценку состояния и результатов деятельности как составляющих структурных подразделений, так и вуза в целом. При этом основными функциями разработанной ИС являются [14, с. 55; 10, с. 5]:

- автоматизация процессов мониторинга образования;
- ввод комплексных данных показателей мониторинга для оценки эффективности деятельности результатов образовательной ВУЗа;
- осуществление расчетных операций сравнения частных показателей мониторинга с нормативными (стандартными) данными;
- агрегирование неоднородных различных данных (уровней) мониторинга;
- формирование единого интерфейса для пользователя и разработка типовых форм документации, издание интегрированной общей платформы оценки результатов эффективности деятельности ВУЗов.

Общее назначение ИС мониторинга образования вузов состоит в информационном обеспечении данными измерений, контроля, анализа и оценки состояния образовательного процесса объектов мониторинга.

Реализация ИС мониторинга образования обеспечит решение следующих задач:

- создание единой корпоративной информационной среды результатов измерений, анализа и оценки состояния образовательного процесса ВУЗов;
- создание интегрированной и единой системы измерений, анализа и оценки параметров образовательного процесса ВУЗов;
- формирование индивидуальных и итогового уровней мониторинга образования, что позволит выработать управленческие решения на перспективу;
- информационное сопровождение управления вузам.

Для реализации системы мониторинга образовательного процесса разработано программное обеспечение с разработкой методики ввода исходных данных, а также их обработки по оценочному показателю. Результатом моделирования будет получен список объектов мониторинга (ВУЗов) с уровнями показателей по каждой позиции «Задач реализации обеспечения эффективности и интегральным уровням мониторинга». Согласно заданным условиям программного обеспечения предусмотрена возможность ранжирования по показателям и критериям обеспечения эффективности образовательного процесса в рамках ВУЗа.

Разработанная система обеспечивает осуществление ввода исходных данных, их управление, регистрацию, а также изменение при необходимости. Предусмотрены возможности для доступа непосредственному исполнителю, административному персоналу, а также руководству вузом и мониторинговым службам в аналитических и управленческих целях.

В системе представлены основные ключевые служебные функции для управления системой мониторинга образования ВУЗов:

- навигации;
- функциональные операции;
- выбор
- управление административными функциями.

В автоматизированной информационной системе клиентский уровень реализован с помощью фреймворка Angular и языка программирования JavaScript.

Web-сервер располагается на втором уровне, на котором сосредоточена большая часть бизнес-логики. Вне его располагаются фрагменты, экспортируемые на терминалы, а также погруженные в третий уровень хранимые процедуры и триггеры. Второй уровень строится как программный интерфейс, связывающий клиентские компоненты с прикладной логикой БД.

Для реализации второго уровня использовалась концепция объектно-ориентированного программирования. При описании функционирования СУБД разработаны классы-исключения, обеспечивающие удобство обработки ошибок.

Сервер базы данных обеспечивает хранение данных и представляется третьим уровнем, который является базой данных вместе с хранимыми процедурами, триггерами и схемой, описываю-

щей приложение в терминах реляционной модели. Предполагается формирование и передача готовых запросов от web-приложения на сервер. В процессе обработки данных сервером осуществляется формирование необходимых данных, которые далее передаются обратно web-приложению. На основе полученных данных web-приложение формирует отчеты в виде таблиц на пользовательском интерфейсе либо создает Excel-файлы для дальнейшего использования.

Для реализации интерфейса информационной системы использовалось программное средство WebSharp, входящее в состав продуктов IntelliJ. Для организации базы данных в качестве сервера выбраны инструменты MySQL 8.3. Особенность этого выбора обусловлена наличием визуальной среды разработки, что предоставляет создавать интерфейсы взаимодействия с пользователем в максимально короткие сроки и обеспечивает легкость в отладке и модификации информационной системы.

В соответствии регламентом процессов мониторинга образования разрабатываемая ИС по функционалу включает следующие модули:

- вход в систему;
- панель администратора;
- управление показателями;
- управление отчетами.

Функции, предусмотренные без авторизации:

- индивидуальные итоги оценочных показателей мониторинга конкретного вуза;
- интегральные итоги мониторинга группы ВУЗов;
- формирование данных уровня задач эффективности образовательного процесса и показателей мониторинга ВУЗов по ранжировке;
- мониторинговые данные по годам.

Авторизация ролей в системе будет по следующим группам:

- администратор;
- администратор службы оценки образовательного процесса ВУЗа;
- руководитель академической работы в ВУЗе.

В работе применяется технология WEB – сервисов, являющаяся эффективным механизмом взаимодействия разработанной информационной системы и обмена данными между системами. Методы исследования основана на теории информационных процессов и систем, статистического анализа данных, теоретических основ проектирования информационных данных.

Главная страница административного интерфейса с ключевыми функциями управления системой мониторинга ВУЗов приведена на рисунке 4.

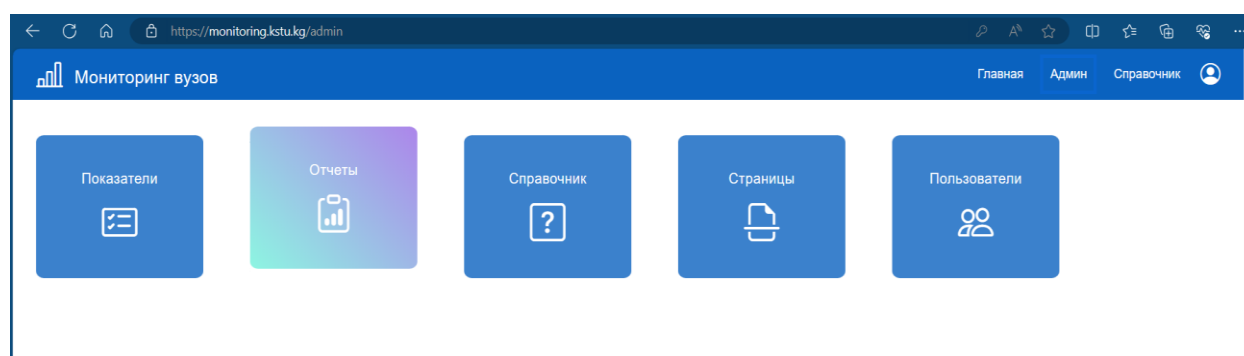


Рис. 4. Административное меню

Разработанная система предусматривает вариации отчетности, что включает:

- индивидуальные отчеты по мониторингу ВУЗа;
- общие отчеты по мониторингу группы ВУЗов;
- ранжировка индивидуальных (частных) уровней показателей мониторинга;
- отчет по годам;

Интерфейс управления отчетами позволяет администраторам и авторизованным пользователям эффективно управлять отчетностью, что является ключевым компонентом в процессе мониторинга и оценки деятельности ВУЗов.

Окончательный интегральный итог уровня мониторинга образования ВУЗов производился по выбранным оценочным показателям эффективности образовательного процесса согласно алгоритму программного обеспечения. При этом итоговый показатель мониторинга представляет среднеарифметический уровень полученных значений по всем индикаторам мониторинга.

Экспериментальные исследования проводились на базе данных Ошского технологического университета им. М. Адышева и Кыргызского государственного университета им. И. Раззакова за 2023-2024 гг.

Приводим отчетные данные по итогам мониторинга указанных университетов. Итоговый уровень мониторинга ОшТУ составил 0.52. При этом он имеет резервный запас инфраструктуры, обусловленный имеющейся дополнительной площадью для организации образовательной деятельности. Результаты мониторинга КГТУ составил 0.58. В табл. 2 и 3 представлены данные КГТУ и ОшТУ соответственно.

Таблица 2

Данные по всем показателям КГТУ

Кыргызский Государственный Технический университет им.И.Раззакова 2024				
№	Наименование показателей задач эффективности образования	Результат	Резерв	
I. Обеспечение привлекательности образования для потребителей				
1.1	Средний балл ОРТ, поступивших на 1 курс студентов	0.83		
II. Реализация инновационных образовательных программ				
2.1.	Удельное количество реализуемых инновационных, высокотехнологичных	0.84		
3.2.	Удельное число образовательных программ PhD	0.50		
III. Соответствие формы и содержания образовательного процесса стандартным требованиям				
4.3.1.	Удельное число учебных дисциплин инновационного профиля (зеленая тех	0.50		
5.3.2.	Доля штатного ППС с учеными степенями	0.89		
6.3.3.	Площадь учебно-лабораторных помещений в расчете на 1 студента	1.00	0.67	
IV. Интеграция науки и образования				
7.4.1.	Удельное число исследовательских лабораторий и научных центров иннов	0.67		
8.4.2.	Удельный объем финансирования	0.24		
9.4.3.	Число патентов и авторских свидетельств в расчете на 1 ППС в год	0.50		
10.4.4.	Число статей, индексируемых в РИНЦ в расчете на одного ППС в год	0.83		
11.4.5.	Число статей, индексируемых в Scopus в расчете на одного ППС в год	0.30		
V. Международная интеграция				
12.5.1.	Удельное число международной мобильности студентов	0.40		
13.5.2.	Доля обучающихся иностранных студентов	0.20		
14.5.3.	Удельное число международной мобильности ППС	0.16		
15.5.4.	Доля зарубежных профессоров, ведущих занятия и выполняющих совместн	0.24		
VI. Позиционирование образования и признание потребителей				
16.6.1.	Доля трудоустройства выпускников вуза	1.00		
17.6.2.	Доля бизнес-процессов, управления образованием цифровыми технологи	0.60		
18.6.4.	Импакт-фактор научных журналов в РИНЦ	0.67		
	Средний показатель	0.58		

Таблица 3

Данные по всем показателям ОшТУ

Ошский технологический университет имени М. М. Адышева 2024				
№	Наименование показателей задач эффективности образования	Результат	Резерв	
I. Обеспечение привлекательности образования для потребителей				
1.1	Средний балл ОРТ, поступивших на 1 курс студентов	0.64		
II. Реализация инновационных образовательных программ				
2.1.	Удельное количество реализуемых инновационных, высокотехнологичных	0.64		
3.2.	Удельное число образовательных программ PhD	0.40		
III. Соответствие формы и содержания образовательного процесса стандартным требованиям				
4.3.1.	Удельное число учебных дисциплин инновационного профиля (зеленая тех	0.25		
5.3.2.	Доля штатного ППС с учеными степенями	0.90		
6.3.3.	Площадь учебно-лабораторных помещений в расчете на 1 студента	1.00	0.53	
IV. Интеграция науки и образования				
7.4.1.	Удельное число исследовательских лабораторий и научных центров иннов	0.72		
8.4.2.	Удельный объем финансирования	0.17		
9.4.3.	Число патентов и авторских свидетельств в расчете на 1 ППС в год	0.40		
10.4.4.	Число статей, индексируемых в РИНЦ в расчете на одного ППС в год	0.38		
11.4.5.	Число статей, индексируемых в Scopus в расчете на одного ППС в год	0.07		
V. Международная интеграция				
12.5.1.	Удельное число международной мобильности студентов	1.00		
13.5.2.	Доля обучающихся иностранных студентов	1.00	4.46	
14.5.3.	Удельное число международной мобильности ППС	0.00		
15.5.4.	Доля зарубежных профессоров, ведущих занятия и выполняющих совместн	0.24		
VI. Позиционирование образования и признание потребителей				
16.6.1.	Доля трудоустройства выпускников вуза	0.86		
17.6.2.	Доля бизнес-процессов, управления образованием цифровыми технологи	0.60		
18.6.4.	Импакт-фактор научных журналов в РИНЦ	0.01		
	Средний показатель	0.52		

Результаты итогового мониторинга указанных университетов показывает, что в настоящее время в силу сложившейся социально-экономического уровня в стране, отсутствия практики инновационного подхода и коммерциализации научных работ в ВУЗах недостаточно развиты инфраструктурные, ресурсные, интеграционные, информационные, финансовые обеспечения. В то же время нормативные показатели параметров образовательной деятельности установлены в тех рамках, что соответствует тенденциям передовой практики. Индивидуальные уровни мониторинга имеют широкий диапазон значений, в которых некоторые показатели соответствуют нормативным требованиям. Отчеты о результатах мониторинга и предложения по коррекции результатов передаются в службу мониторинга и ректорат ВУЗа, на основе чего определяется результативность проведенного мониторинга, проектируются цели учебного процесса, а также разрабатываются дополнительные мероприятия, направленные на повышение образовательных результатов, и рекомендации по их внедрению в учебный процесс ВУЗа.

Заключение

Формирование и реализация системы мониторинга образования ВУЗов рассмотрена как актуальная проблема образовательной деятельности современности, решаемая формализацией ее параметров с использованием аппарата информационных технологий. Обоснованы и выбраны составляющие системы мониторинга, по которым установлены соответствующие оценочные показатели, характеризующие эффективности результатов деятельности ВУЗов. Рассмотрена классификация показателей ВУЗа системы мониторинга, а также разработан метод для расчета интегральных и частных комплексных показателей образовательной деятельности ВУЗа.

Проведен анализ и описание моделирования системы мониторинга образования ВУЗов. Рекомендуются внедрение информационной системы в мониторинге образования ВУЗов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азимова А.А., Торобеков Б.Т., Тажигулова Г.О., Жусуева Н.Ж. Развитие системы мониторинга образования вузов // Проблемы автоматизации и управления. 2023. № 3(48). С. 72–80.
2. Азимова А.А. Анализ информационных систем мониторинга деятельности вузов // Бюл. науки и практики. 2022. Т. 8. № 9. С. 547–551.
3. Азимова А.А., Бостанова П.З., Жамгырчиева Г.Т., Арзыбаева М.А., Зикирова Г.А. Разработка методики проведения мониторинга образовательного процесса в высших учебных заведениях // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2024. № 5. С. 19–23.
4. Багаутдинова С.Ф., Левшина Н.И., Санникова Л.Н. [и др.] Разработка и организация системы мониторинга качества образовательной деятельности студентов в высшем учебном заведении // Фундамент. исслед. 2014. № 1. С.109–114 с.
5. Винокуров М.А. Мониторинг эффективности Российских вузов: совершенствование методологии // Изв. Иркут. гос. экон. академии. 2013. № 6(92). С. 5–11.
6. Глебова Л.Н., Кузнецова М.Д., Шадриков В.Д. Мониторинг качества высшего педагогического образования: моногр. М.: Логос, 2012. 368 с.
7. Драгуновская О.И., Журин В.О. Автоматизированная информационная система мониторинга учебной, научной, творческой, спортивной и общественной деятельности учащихся вуза с использованием технологии OLAP-кубов // Концепт. 2016. Т.11. С. 3396–3400.
8. Копелиович Д.И. Драгуновская О.И. Использование хранилища данных для информационно-аналитической системы мониторинга деятельности студентов вузов // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2016. № 4(52). С. 1–7.
9. Мацкевич С.А. Менеджмент в системе образования: теория и практика инновационной подготовки профессионалов. Минск: Издатель И.П. Логвинов, 2011. 260 с.
10. Немцев А.Н., Штифанов А.И., Беленко В.А. [и др.] Проектирование автоматизированной информационной системы мониторинга деятельности образовательных учреждений и предоставления «электронных услуг» в сфере образования // Научные ведомости. Серия История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. № 13 (108). Выпуск 19/1. С. 1–11.
11. Сидорова А.А. Мониторинг эффективности деятельности вузов как инструмент повышения качества высшего образования // Гос. упр. Электрон. вестн. 2013. № 41. С. 248–259.
12. Сухов М.В. Разработка информационной системы повышения эффективности образовательного процесса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. М.В. Сухов. Алма-Ата, 2010. 26 с.
13. Торобеков Т.Б., Азимова А.А. Модель мониторинга эффективности деятельности вузов // Alatau academic studies. 2023. № 3. С. 161–171.
14. Торобеков Б.Т., Азимова А.А. Информационные системы в модели управления высшим учебным заведением // Изв. ОшТУ. 2018. № 1. С. 54–59.
15. Часовских В.П., Попов В.А., Карасева О.А. Модель поддержки мониторинга вузов // Современ. проблемы науки и образования. 2009. № 5. С. 191–197.

Торобеков Бекжан Торобекович

Д.т.н., проф. каф. «Организация перевозок и управление транспортом»
Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова
720044, Кыргызстан, г. Бишкек, Айтматова пр., 66,
Тел.: +996-772-534-671
Эл. почта: torobekov@kstu.kg

Кошоева Бибигуль Бейшенбековна

К.т.н., доцент каф. «Автоматическое управление»
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
720044, Кыргызстан, г. Бишкек, Айтматова пр., 66,
Тел.: +996-551-779-422
Эл. почта: koshoeva@kstu.kg

Азимова Алиматкан Алибаевна

Старший преподаватель каф. «Информатика, программирование и связь»
Ошский технологический университет им. М.М. Адышева,
723500, Кыргызстан, г. Ош, ул. Исанова, 81,
Тел.: +996-778-233-132,
Эл. почта: alima_kg75@mail.ru

Бакалова Айгюзель Таалайбековна

Старший преподаватель каф. «Телематика»
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
720044, Кыргызстан, г. Бишкек, Айтматова пр., 66,
Тел.: +996-702-046-893
Эл. почта: aigiuzel.bakalova@kstu.kg

Жамгырчиева Гульмира Толобаевна

Старший преподаватель каф. «КРИИЯ»
Кыргызский национальный аграрный университет им. К. Скрябина,
720005, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Медерова 68,
Тел.: +996-777-212-260,
Эл. почта: jgulmira2011@mail.ru

T.B. TOROBEKOV, B.B. KOSHOEVA, A.A. AZIMOVA, A.T. BAKALOVA, G.T. JAMGYRCHIEVA

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING THE EDUCATIONAL PROCESS OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION

The article is devoted to the formation of the system of monitoring the educational activity of universities on the basis of information system. The analysis of the current state of trends in the development and efficiency of the educational system is given. The prerequisites of implementation, characteristics and functionality of the monitoring system of universities are analyzed. The formation of the methodology of monitoring the educational process of higher education institution is substantiated. The system of evaluation criteria and monitoring indicators with the description of their systematization and classification is developed. The characteristics of monitoring indicators, calculation formulas for their determination, the order of actualization for modeling are given. The application of the information system in the monitoring of universities is proposed. The modeling of business processes of the system of monitoring the education of universities is described. The main characteristics and architecture of the developed system are given, on the basis of which the final levels of monitoring on the example of two universities are presented.

Keywords: university, monitoring, efficiency, evaluation criteria, educational process, indicator, rating system, business processes, methodology, modeling.

REFERENCES

1. Azimova A.A., Torobekov B.T., Tazhygulova G.O., Zhusueva N.Zh. Development of the University Education Monitoring System. *Problems of Automation and Control*. 2023. No. 3(48). P. 72–80.
2. Azimova A.A. Analysis of Information Systems for Monitoring University Activities. *Bulletin of Science and Practice*. 2022. Vol. 8. No. 9. P. 547–551.
3. Azimova A.A., Bostonova P.Z., Zhamgyrchieva G.T., Arzybaeva M.A., Zikirova G.A. Development of a Methodology for Monitoring the Educational Process in Higher Education Institutions. *Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*. 2024. No. 5. P. 19–23.
4. Bagautdinova S.F., Levshina N.I., Sannikova L.N. [et al.] Development and Organization of a System for Monitoring the Quality of Students' Educational Activities in Higher Education Institutions. *Fundamental Research*. 2014. No. 1. P. 109–114.
5. Vinokurov M.A. Monitoring the Efficiency of Russian Universities: Methodology Improvement. *Bulletin of Irkutsk State Economic Academy*. 2013. No. 6(92). P. 5–11.
6. Glebova L.N., Kuznetsova M.D., Shadrikov V.D. Monitoring the Quality of Higher Pedagogical Education: Monograph. Moscow. Logos. 2012. 368 p.
7. Dragunovskaya O.I., Zhulin V.O. Automated Information System for Monitoring Educational, Scientific, Creative, Sports, and Social Activities of University Students Using OLAP Cube Technology. *Concept*. 2016. Vol. 11. P. 3396–3400.
8. Kopeliovich D.I., Dragunovskaya O.I. Use of a Data Warehouse for an Information-Analytical System for Monitoring University Student Activities. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016. No. 4(52). P. 1–7.

9. Matskevich S. A. Management in the Education System: Theory and Practice of Innovative Professional Training. Minsk. Publisher I.P. Logvinov. 2011. 260 p.
10. Nemtsev A.N., Shtifanov A.I., Belenko V.A. [et al.] Design of an Automated Information System for Monitoring the Activities of Educational Institutions and Providing "E-Services" in Education. *Scientific News. Series History. Political Science. Economics. Computer Science*. 2011. No. 13 (108). Issue 19/1. P. 1–11.
11. Sidorova A.A. Monitoring the Performance of Universities as a Tool for Improving the Quality of Higher Education. *Public Administration Electronic Bulletin*. 2013. No. 41. P. 248–259.
12. Sukhov M.V. Development of an Information System to Improve the Efficiency of the Educational Process: Abstract of PhD Dissertation in Technical Sciences: 05.13.01. M.V. Sukhov. Almaty, 2010. 26 p.
13. Torobekov T.B., Azimova A.A. A Model for Monitoring University Performance Efficiency / *Alatoo Academic Studies*. 2023. No. 3. P. 161–171.
14. Torobekov B.T., Azimova A.A. Information Systems in the Management Model of Higher Education Institutions. *Bulletin of Osh Technological University*. 2018. No. 1. P. 54–59.
15. Chasovskikh V.P., Popov V.A., Karaseva O.A. A Model for Supporting University Monitoring. *Modern Problems of Science and Education*. 2009. No. 5. P. 191–197.

Torobekov Bekzhan Torobekovich

Doc. of Technical Sciences, Prof. of "Organization of transportation and transport management" department
I. Razzakov Kyrgyz State Technical University
720044, Kyrgyzstan, Bishkek, Aitmatov Ave., 66,
Phone: +996-772-534-671
E-mail mail: torobekov@kstu.kg

Azimova Alimakan Alibaevna

Senior Lecturer, Department of "Informatics, Programming and Communication",
Osh Technological University
named after M.M. Adyshev
723500, Kyrgyzstan, Osh city, Isanova Street, 81,
Phone: +996-778-233-132,
E-mail: alima_kg75@mail.ru

Jamgyrchieva Gulmira Tolobaevna

Senior Lecturer of "KRFL" department
Kyrgyz National Agrarian University
named after K. Skryabin
720005, Kyrgyzstan, Bishkek city, Mederova Street, 68
Phone: ++996-777-212-260
E-mail: jgulmira2011@mail.ru

Koshoeva Bibigul Beishenbekovna

PhD of Technical Sciences, Associate Professor
of "Automation control" department
I. Razzakov Kyrgyz State Technical University
720044, Kyrgyzstan, Bishkek, Aitmatov Ave., 66,
Phone: +996-551-779-422
E-mail: koshoeva@kstu.kg

Bakalova Aigiuzel Taalaibekovna

Senior Lecturer of "Telematics" department
I. Razzakov Kyrgyz State Technical University
720044, Kyrgyzstan, Bishkek, Aitmatov Ave., 66,
Phone: +996-702-046-893
E-mail: aigiusel.bakalova@kstu.kg

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЖУКА

Статья посвящена разработке и исследованию возможности применения алгоритма потенциального управления группой мобильных роботов в среде с динамическими препятствиями на основе модифицированного метода жука. Рассматриваются особенности стратегии потенциального управления группой мобильных роботов. Проведена компьютерная апробация разработанного алгоритма в среде симулятора CoppeliaSim с помощью скриптов на языке Python.

Ключевые слова: группа мобильных роботов, мультиагентная система, динамическая среда, методы потенциальных полей, задача обхода препятствий, модифицированный метод жука, стратегия потенциального управления.

Введение

Задача управления группой мобильных роботов (МР) с обеспечением безопасного достижения целей является актуальной задачей современной робототехники. При этом среда функционирования МР часто является динамической, то есть содержит динамические препятствия (ДП). Динамическую среду называют *частично известной*, если известны только положения статических препятствий (СП). В безопасности и успешности движения группы МР ключевую роль играют скорость реакции роботов на движение ДП, других роботов и способность упреждающего движения.

В статье разработан алгоритм потенциального управления группой МР в частично известной динамической среде на основе модифицированного метода жука: данный метод используется для построения опорных траекторий движения роботов к целям, которые затем корректируются с помощью стратегии потенциального управления.

Постановка задачи

Рассматривается математическая модель двухколесного МР, оснащенного ультразвуковыми датчиками расстояния обнаружения препятствий с заданным радиусом видимости r_v .

На рисунке 1 представлен пример среды функционирования МР. Здесь на рисунке $\mathbf{r} = (x, y)$ - радиус-вектор робота, соединяющий начало координат с его центром масс (ЦМ), θ - угол между вектором скорости робота $\mathbf{v}$ и осью Ox , задающий его ориентацию; $\mathbf{d}_0$ - вектор, соединяющий ЦМ робота с ближайшей точкой препятствия, а $\mathbf{d}_g$ - вектор, соединяющий ЦМ робота с целью.

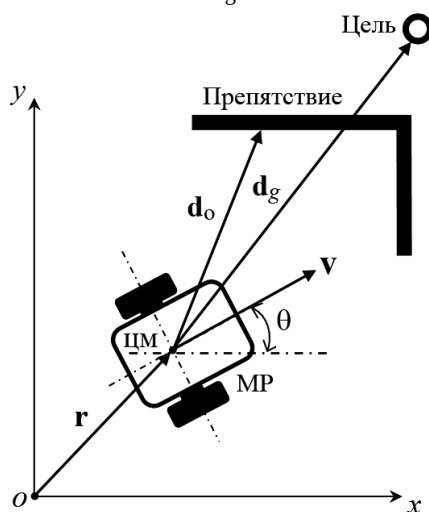


Рис. 1. Пример среды функционирования МР

Введем следующие обозначения: V и Ω - соответственно модуль скорости и угловая скорость робота, а J - его момент инерции при вращении вокруг вертикальной оси, проходящей че-

рез ЦМ робота; m и m_p - соответственно масса робота и платформы; a - половина расстояния между колесами робота, R - радиус его колес.

Тогда динамика движения МР описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos(\theta), \\ \dot{y} = V \sin(\theta), \\ \dot{\theta} = \Omega, \\ m\dot{V} = m_p a \Omega^2 + \frac{u_1 + u_2}{R}, \\ J\dot{\Omega} = m_p a \Omega V + u_1 - u_2, \end{cases}$$

Выделяются два вида препятствий: СП и ДП, причем положения всех СП среды считаются известными, а скорость ДП не превышает максимальную скорость движения МР.

Ставится следующая *задача управления*: для группы МР с заданными математическими моделями динамики движения требуется распределить цели движения между роботами и обеспечить безопасное их движение к целям с обходом статических и динамических препятствий.

Подход к управлению группой МР

Существуют три подхода к управлению группой МР: *централизованный, децентрализованный, гибридный* [1].

При *централизованном* подходе существует центр управления, который распределяет цели и осуществляет локальное планирование движения МР. Недостатком подхода является экспоненциальный рост вычислительной сложности планирования движения МР группы при увеличении их числа. А также выход центра управления из строя приводит к выходу из строя всей группы МР.

При *децентрализованном* подходе каждый МР самостоятельно планирует свое движение. Такие системы более надежны, а рост числа МР в группе не увеличивает вычислительную сложность планирования движения.

Гибридный подход является комбинацией централизованного и децентрализованного подходов. Каждый МР самостоятельно планирует свое движение, а центр управления используется для обмена информацией между ними.

В данной работе используется гибридный подход к управлению группой МР:

- в распределении целей между роботами участвует центр управления;
- локальное планирование движения МР осуществляют самостоятельно;
- при встрече нескольких роботов группы среди них выбирается один или несколько временных центров управления.

В общем случае задача оптимального распределения целей в группе МР является NP-полной [2]. Известные подходы к распределению целей в группе МР – перебор всех возможных вариантов, использование муравьиного алгоритма, генетических алгоритмов и др. В настоящей работе используется аукционный алгоритм [3], основанный на мультиагентном представлении группы МР. Здесь каждый робот выступает в качестве агента, участвующего в аукционе за цели и обладающего ограниченным ресурсом для их покупки. Целесообразность покупки определяется разностью между ценностью цели и стоимостью ее достижения. В качестве стоимости достижения цели МР выступает длина его пути до цели.

Локальная навигация и планирование движения МР

Основными подходами к навигации являются *спутниковая навигация, использование радиомаяков, одометрия*. *Спутниковая навигация* плохо применима к МР, т.к. часто невозможна в помещениях, а ее точность обычно больше размеров МР. *Использование радиомаяков* хорошо подходит для помещений, но требует предварительной установки оборудования и лишает робота возможности выбирать альтернативный путь движения. Визуальная одометрия [4-6] и термоинерциальная одометрия [7-9] являются примерами *одометрии* – основного подхода к навигации МР. Однако для применения визуальной одометрии требуется хорошая освещенность, отсутствие тумана, дыма. Термоинерциальная одометрия плохо применима в помещениях из-за малых температурных градиентов, что приводит к низкому числу ориентиров. В одометрии также часто используют ультразвуковые датчики. Они не зависят от освещенности и температуры объектов, наличия

тумана и дыма, обладают высокой точностью. В работе будут использоваться МР с ультразвуковыми датчиками расстояния.

Локальное планирование движения МР отвечает за принятие решений в реальном времени. Основными подходами к такому планированию являются *методы потенциальных полей, гистограмма векторных полей, методы жука, алгоритм динамического окна* [10].

Методы потенциальных полей (ПП) [11] являются наиболее простыми и перспективными подходами к управлению МР. Основной идеей является наделение МР и препятствий среды виртуальным отрицательным зарядом, а цели – виртуальным положительным зарядом. Тогда робот будет отталкиваться от препятствий и притягиваться к цели. В работе [12] было рассмотрено применение метода ПП в динамической среде. Основным недостатком методов ПП является возможность попадания МР в локальные минимумы, из которых он не способен выбраться самостоятельно. Для решения этой проблемы в работе [13] авторы скомбинировали метод ПП с генетическими алгоритмами, в [14] – с методом роя частиц.

Алгоритм *гистограммы векторных полей* (VFH) [15] заключается в создании полярной гистограммы для вычисления плотности препятствий вокруг робота и выборе угла поворота с наименьшей плотностью препятствий. Основными недостатками данного подхода являются высокая вычислительная сложность и возможность попадания в ловушку. В работах [16, 17] представлены улучшенные алгоритмы VFH+ и VFH*.

Классические методы жука [18] обеспечивают безопасное движение МР в статической среде (среде с СП). Идея классических методов жука заключается в движении МР вдоль вектора градиента, обеспечивающего минимальный путь следования к цели в свободном пространстве, с обходом препятствий. Основными их недостатками являются необходимость обхода существенной части препятствий и сложность применения в динамической среде (среде в ДП).

Алгоритм динамического окна (DWA) [19] заключается в поиске набора скоростей робота, достижимых за некоторое время и максимизирующих целевую функцию. Основным недостатком данного метода является его плохая приспособленность к наличию ДП. Попытка решения этой проблемы была представлена, например, в работе [20].

В основе данной работы лежит модифицированный метод жука (ММЖ) [21-25], являющийся комбинацией методов ПП и классических методов жука. В [24, 25] для управления движением МР в динамической среде была предложена и улучшена стратегия потенциального управления (СПУ), основанная на ММЖ, ПП и упреждении движения. При этом использование методов ПП в качестве основы СПУ существенно снижает вычислительную сложность алгоритма.

ММЖ в задачах управления МР

Согласно методам ПП, МР движется в результирующем потенциальном поле препятствий к цели.

Притягивающий МР к цели потенциал $U_{att}(\mathbf{r})$ распространяется на всю среду функционирования робота. Он равен нулю тогда и только тогда, когда положение робота и цели совпадают. Тогда в каждой точке на МР действует виртуальная притягивающая сила:

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{r}).$$

Отталкивающий от препятствия потенциал $U_{rep}(\mathbf{r})$ распространяется только на ограниченную область отталкивания от этого препятствия. Тогда действующая на МР виртуальная отталкивающая сила имеет следующий вид:

$$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}) = \sum_i -\nabla U_{rep_i}(\mathbf{r}).$$

Движение МР массой m осуществляется под действием результирующей виртуальной силы:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}_{att}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}).$$

ММЖ сочетает в себе методы ПП и классические методы жука:

- в свободном пространстве МР движется к цели по прямой линии;
- направление движения МР в каждой точке стремится к вектору результирующей виртуальной силы, действующей на робота.

Робот начинает обход препятствия, если в радиусе ρ_0 от него найдено препятствие в направлении движения. При этом обход препятствия завершается, если выполнены следующие условия:

- робот приблизился к цели;

- у робота на пути к цели нет препятствий в радиусе видимости;
- угол между векторами $\mathbf{d}_g$ и $\mathbf{d}_0$ оказался не острый.

Виртуальная сила притяжения к цели $\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r})$ имеет следующий вид:

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r}) = k_a \cdot \frac{\mathbf{d}_g(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_g(\mathbf{r})\|}, \quad k_a = \text{const} > 0.$$

Пусть ρ_r – ширина зоны действия отталкивающей силы, причем $\rho_r < \rho_v$. Тогда виртуальные силы отталкивания от препятствий $\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r})$ задаются следующим выражением:

$$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}) = \begin{cases} -k_r \cdot \left(\frac{1}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|} - \frac{1}{\rho_r} \right) \cdot \frac{\mathbf{d}_0(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|^3}, & \|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\| \leq \rho_v, \\ 0, & \|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\| > \rho_v, \end{cases}$$

где $k_r = \text{const} > 0$, а виртуальная тангенциальная сила $\mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r})$, способствующая обходу препятствий, задается следующим образом:

$$\mathbf{F}_{tan}^{\pm}(\mathbf{r}) = \frac{k_t}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|} \cdot (\pm d_{0_2}, \mp d_{0_1}),$$

где $k_t = \text{const} > 0$, причем $k_t > k_a$; $\mathbf{F}_{tan}^+(\mathbf{r})$ соответствует обходу препятствия справа, а $\mathbf{F}_{tan}^-(\mathbf{r})$ – слева.

Равнодействующая виртуальная сила $\mathbf{u}(\mathbf{r})$, определяющая целевое направление движения МР, имеет следующий вид:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r})}{\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r})\|}, & \text{в свободном пространстве} \\ \frac{\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r})}{\|\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r})\|}, & \text{при обходе препятствия} \end{cases}$$

В настоящей работе ММЖ используется для расчета опорной траектории движения МР. Однако, поскольку данная траектория движения робота не учитывает наличие ДП и соседних роботов, то рассчитанная траектория движения будет корректироваться с использованием СПУ.

Основные положения СПУ МР

Выделим два режима движения МР:

- режим движения МР при отсутствии ДП в радиусе видимости – «*движение МР по опорной траектории*». В этом режиме робот движется к цели по опорной траектории;
- режим движения МР при наличии ДП в радиусе видимости – «*движение МР на упреждение ДП*». В этом режиме робот корректирует опорную траекторию для уклонения от ДП, используя алгоритм упреждающего управления, состоящий из *предсказания столкновения робота с ДП, выбора точки его притяжения* для исключения столкновения с ДП, *движения робота с коррекцией опорной траектории* для ухода от ДП.

Для *предсказания столкновения МР с ДП* определяется скорость ДП $\mathbf{v}_0$ на основе показаний

датчиков расстояния: $\mathbf{v}_0 = \frac{\mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1}{\Delta t} + \mathbf{v}$, где $\mathbf{d}_1$, $\mathbf{d}_2$ – векторы, соединяющие ЦМ робота с ближайшей точкой ДП в моменты времени, разделенные малым Δt (см. рис. 2).

Определим вектор столкновения МР с ДП в некоторый момент времени t : $\mathbf{d}_m(t) = \mathbf{d}_2 + (\mathbf{v}_0 - \mathbf{v})t$. Столкновение считается предсказанным в следующие T секунд, если $\exists t \in [0, T]: \|\mathbf{d}_m(t)\| < \rho_s$, где ρ_s – минимальная допустимая дистанция от ЦМ робота до ближайшей точки препятствия.

Для *выбора точки притяжения МР* последовательно перебираются точки опорной траектории, начиная с той, которую робот покинул. Перебор продолжается до тех пор, пока каждая следующая точка оказывается ближе к роботу, чем предыдущая. На рисунке 3 изображен сход МР с опорной траектории.

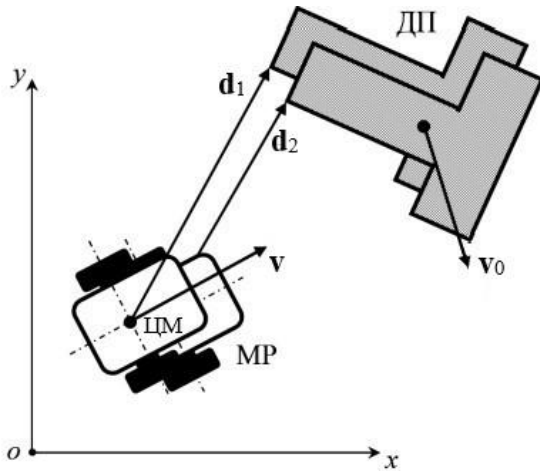


Рис. 2. Схема для предсказания столкновения МР с ДП

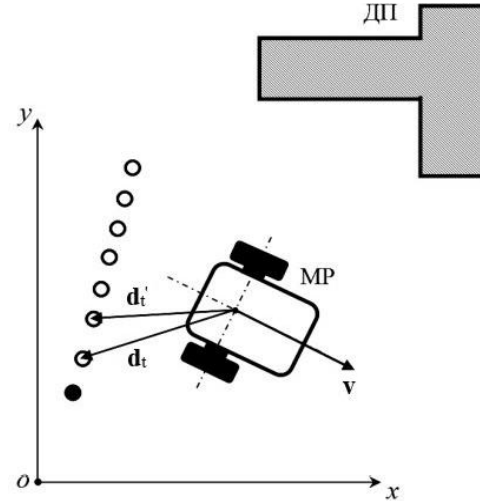


Рис. 3. Сход МР с опорной траектории

Для первой выбранной точки вычисляется и запоминается вектор $\mathbf{d}_t$ от ЦМ МР. Если для следующей точки опорной траектории с $\mathbf{d}_t'$ выполнено условие $\|\mathbf{d}_t'\| \leq \|\mathbf{d}_t\|$, то запоминается $\mathbf{d}_t = \mathbf{d}_t'$. Этот цикл повторяется до тех пор, пока данное условие выполняется. Последняя запомненная точка является точкой притяжения МР при обходе ДП.

Для движения МР с коррекцией опорной траектории задаются виртуальные потенциальные силы для следующих двух ситуаций:

1. ДП находится рядом с МР. Пусть выполнено хотя бы одно из следующих условий:

- столкновение робота с ДП предсказано;
- ДП находится в направлении точки притяжения;
- робот движется от точки притяжения.

Тогда на МР действуют следующие виртуальные тангенциальная и отталкивающая от ДП силы:

$$\mathbf{F}_{\tan}^s(\mathbf{r}) = \frac{k_t}{\|\mathbf{d}_2(\mathbf{r})\|} (\pm d_{2_2}, \mp d_{2_1}),$$

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{r}) = \begin{cases} -k_r \left(\frac{1}{\|\mathbf{d}_2(\mathbf{r})\|} - \frac{1}{\rho_r} \right) \frac{\mathbf{d}_2(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_2(\mathbf{r})\|^3}, & \|\mathbf{d}_2(\mathbf{r})\| \leq \rho_r, \\ 0, & \|\mathbf{d}_2(\mathbf{r})\| > \rho_r, \end{cases}$$

со следующим направлением s в $\mathbf{F}_{\tan}^s(\mathbf{r})$: $s = \text{sgn}(-\cos(\mathbf{d}_m, \mathbf{v})(\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{d}_{2_1} - \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{d}_{2_0}))$.

2. СП находится рядом с МР. Пусть выполнено хотя бы одно из следующих условий:

- столкновение робота с ДП предсказано;
- робот движется в направлении СП;
- СП находится в направлении точки притяжения и на пути к ней.

Тогда на МР действует следующая виртуальная отталкивающая от СП сила:

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{r}) = \begin{cases} -k_r \left(\frac{1}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|} - \frac{1}{\rho_r} \right) \frac{\mathbf{d}_0(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|^3}, & \|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\| \leq \rho_v, \\ 0, & \|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\| > \rho_v. \end{cases}$$

При этом если на МР не действует тангенциальная сила от ДП, на него действует виртуальная тангенциальная сила от СП:

$$\mathbf{F}_{\tan}^\pm(\mathbf{r}) = \frac{k_t}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|} (\pm d_{0_2}, \mp d_{0_1}),$$

где направление обхода препятствия совпадает с направлением обхода в опорной траектории.

Применение СПУ в изложенном виде к группе МР может приводить к столкновениям.

Особенности применения СПУ к группе МР

До встречи друг с другом МР группы никак не общаются. При встрече они сами становятся ДП, но изложенной СПУ недостаточно для безопасного разрешения конфликта между роботами в составе группы. Поэтому при встрече любых двух МР они объединяются в группу встречи. В этом случае выбор направления обхода соседнего робота осуществляет только один из роботов и сообщает о нем второму.

Наряду с двумя используемыми режимами движения МР введем в рассмотрение новый режим его движения «движение МР назад» для разъезда с другим МР группы. В этом режиме робот корректирует свою опорную траекторию для успешного разъезда с другим роботом группы, двигаясь от него и испытывая силы отталкивания от препятствий и МР группы. Так, пусть для пары роботов (МР1 и МР2), встречающихся в группе, выполняется одна из следующих трех ситуаций:

1) одновременно выполняются условия:

- 1-й робот уже движется назад;
- свободного пространства рядом с 1-м роботом или 2-м роботом недостаточно, чтобы разъехаться (например, из-за наличия узкого коридора);

2) одновременно выполняются условия:

- 2-й робот движется назад на 1-го робота;
- 1-й робот должен двигаться в направлении 2-го робота;

3) одновременно выполняются условия:

- 1-й и 2-й роботы не движутся назад;
- 2-му роботу недостаточно свободного пространства, чтобы разъехаться с 1-м роботом;
- 2-й робот движется в направлении 1-го робота;
- 1-й робот должен двигаться в направлении 2-го робота.

Тогда в этих трех ситуациях МР1 переходит в режим движения назад. Если для МР1 недостаточно свободного пространства, то направление для движения $\mathbf{d}_b$ определяется, как нормаль к прямой, проходящей через пару датчиков с противоположных сторон от МР1 с минимальными показаниями, от МР2 (см. рис. 4). Если же для МР1 хватает свободного пространства, то направление для отъезда робота $\mathbf{d}_b$ выбирается вдоль прямой, соединяющей центры роботов МР1 и МР2, от МР2 (см. рис. 5). При этом во время движения назад робот испытывает силы отталкивания от препятствий.

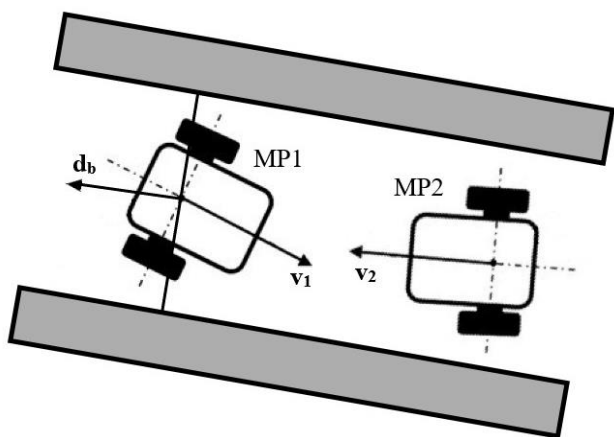


Рис. 4. Выбор направления движения назад, если для МР1 недостаточно свободного пространства

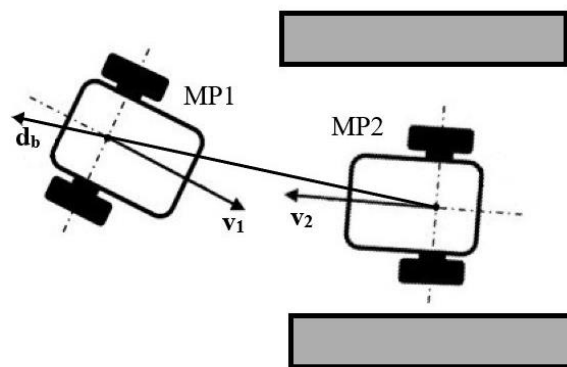


Рис. 5. Выбор направления движения назад, если для МР1 достаточно свободного пространства

Для проверки возможности использования СПУ группой МР была проведена компьютерная апробация в симуляторе CoppeliaSim с помощью скриптов на Python. Моделирование производилось для параметров $\rho_r = 0.5$, $\rho_0 = 1$, $\rho_v = 1$, $\rho_s = 0.25$, $k_a = 1$, $k_r = 1$, $k_t = 2$, $T = 5$. На рисунке 6 представлен процесс движения трех МР к их целям с уклонением от двух ДП в различные моменты времени. В результате мультиагентного распределения задач МР1 выбрал Цель1, МР2 выбрал Цель3, а МР3 выбрал Цель2.

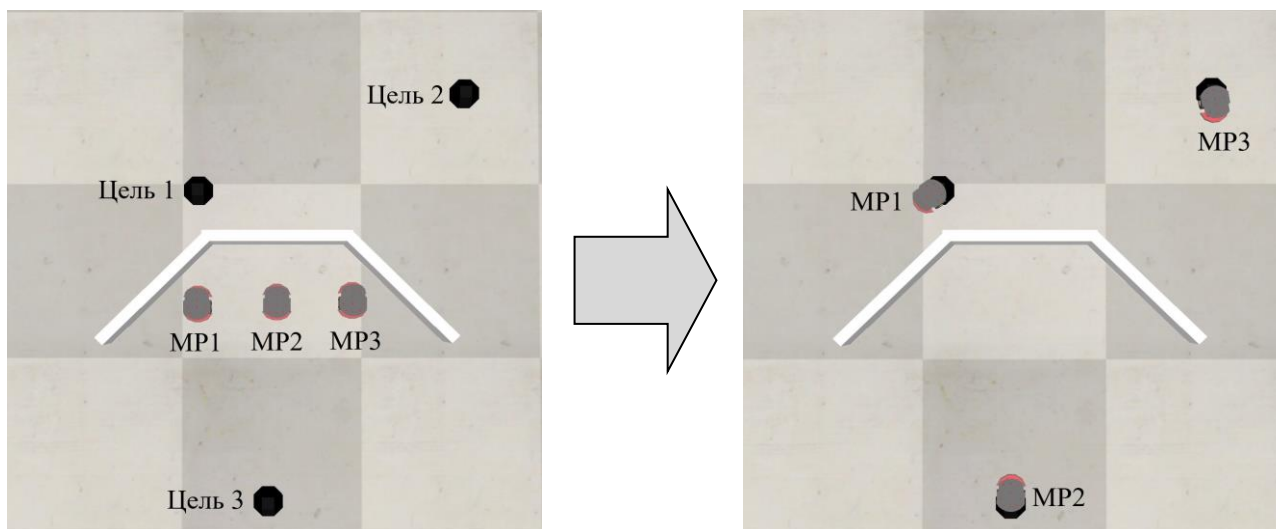


Рис. 6. Процесс движения трех МР к их целям с уклонением от двух ДП в различные моменты времени

Заключение

В работе изложен алгоритм потенциального управления группой мобильных роботов в среде с динамическими препятствиями на основе модифицированного метода жука. Рассматриваются особенности стратегии потенциального управления группой мобильных роботов. Проведена компьютерная апробация разработанного алгоритма в среде симулятора CoppeliaSim с помощью скриптов на языке Python.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ismail Z. H., Sariff N., Hurtado E. G. A survey and analysis of cooperative multi-agent robot systems: challenges and directions // *Applications of Mobile Robots*. 2018. Vol. 5. P. 8-14.
2. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21. №. 4. С. 729-757.
3. Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С. Автономные мобильные роботы-навигация и управление // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2016. №. 2 (175). С. 48-67.
4. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator // *IEEE Trans. on Robotics*. 2018. Vol. 34. No. 4. P. 1004-1020.
5. Sun K. et al. Robust stereo visual inertial odometry for fast autonomous flight // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018. Vol. 3. No. 2. P. 965-972.
6. Bloesch M. et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach // *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE, 2015. P. 298-304.
7. Saputra M. R. U. et al. Deeptio: A deep thermal-inertial odometry with visual hallucination // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5. No. 2. P. 1672-1679.
8. Khattak S., Papachristos C., Alexis K. Keyframe-based thermal-inertial odometry // *Journal of Field Robotics*. 2020. Vol. 37. No. 4. P. 552-579.
9. Zhao S. et al. Tp-tio: A robust thermal-inertial odometry with deep thermalpoint // *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2020. P. 4505-4512.
10. Sánchez-Ibáñez J. R., Pérez-del-Pulgar C. J., García-Cerezo A. Path planning for autonomous mobile robots: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 23. P. 7898.
11. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // *Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 1985. Vol. 2. P. 500-505.
12. Ge S. S., Cui Y. J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method // *Autonomous robots*. 2002. Vol. 13. P. 207-222.
13. Vadakkepat P., Tan K. C., Ming-Liang W. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning // *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation*. CEC00. IEEE, 2000. Vol. 1. P. 256-263.
14. Zhou Z. et al. Tangent navigated robot path planning strategy using particle swarm optimized artificial potential field // *Optik*. 2018. Vol. 158. P. 639-651.
15. Borenstein J. et al. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots // *IEEE transactions on robotics and automation*. 1991. Vol. 7. No. 3. P. 278-288.
16. Ulrich I., Borenstein J. VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots // *Proceedings. 1998 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 1998. Vol. 2. P. 1572-1577.

17. Ulrich I., Borenstein J. VFH/sup*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2000. Vol. 3. P. 2505-2511.
18. Ng J., Bräunl T. Performance comparison of bug navigation algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2007. Vol. 50. P. 73-84.
19. Fox D., Burgard W., Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance // IEEE Robotics & Automation Magazine. 1997. Vol. 4. No. 1. P. 23-33.
20. Cao Y., Nor N. M. An improved dynamic window approach algorithm for dynamic obstacle avoidance in mobile robot formation // Decision Analytics Journal. 2024. Vol. 11. P. 100471.
21. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Два метода локальной навигации мобильных роботов в статических средах с препятствиями // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). 2019. С. 105-107.
22. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. №. 11. С. 677-685.
23. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Кожин М. А. Анализ модифицированного метода жука в задачах локальной навигации мобильных роботов // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2021. №. 7. С. 4-8.
24. Кожин М. А. Стратегия потенциального управления мобильным роботом в динамической среде // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2023. №. 12. С. 26-32.
25. Кожин М. А., Филимонов Н. Б. Потенциальное управление мобильным роботом в среде с динамическими препятствиями на основе модифицированного метода жука // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2024. Т. 8. №. 1. С. 189-195.

Кожин Михаил Александрович

Аспирант каф. физико-математических методов управления, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2
Эл. почта: kojinn@mail.ru

Филимонов Николай Борисович

Д-р техн. наук, Профессор каф. физико-математических методов управления, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2,
Тел.: +7-916-514-71-02,
Эл. почта: nbfilimonov@mail.ru

M.A. KOZHIN, N.B. FILIMONOV

POTENTIAL CONTROL OF MOBILE ROBOT GROUP IN ENVIRONMENT WITH DYNAMIC OBSTACLES BASED ON MODIFIED BUG ALGORITHM

The article focuses on the development and investigation of the possibility of applying potential control of a group of mobile robot algorithm in an environment with dynamic obstacles, based on modified bug algorithm. Specifics of mobile robot group potential control are considered. A computer simulation of the developed algorithm was conducted in CoppeliaSim simulator environment using Python scripts.

Keywords: group of mobile robots, multi-agent system, dynamic environment, potential fields methods, obstacle avoidance problem, modified bug algorithm, potential control strategy.

REFERENCES

1. Ismail Z.H., Sariff N., Hurtado E.G. A survey and analysis of cooperative multi-agent robot systems: challenges and directions. *Applications of Mobile Robots*. 2018. Vol. 5. P. 8-14.
2. Darintsev O.V., Migranov A.B. Analytical review of approaches to the distribution of tasks for mobile robot teams based on soft computing technologies. *Informatics and Automation*. 2022. Vol. 21. No. 4. P. 729-757 (in Russian).
3. Mikhailov B.B., Nazarova A.V., Yuschenko A.S. Autonomous mobile robots-navigation and control. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2016. No. 2 (175). P. 48-67 (in Russian).
4. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Trans. on Robotics*. 2018. Vol. 34. No. 4. P. 1004-1020.
5. Sun K. et al. Robust stereo visual inertial odometry for fast autonomous flight. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018. Vol. 3. No. 2. P. 965-972.
6. Bloesch M. et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach. *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE. 2015. P. 298-304.
7. Saputra M. R.U. et al. Deeptio: A deep thermal-inertial odometry with visual hallucination. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5. No. 2. P. 1672-1679.
8. Khattak S., Papachristos C., Alexis K. Keyframe-based thermal-inertial odometry. *Journal of Field Robotics*. 2020. Vol. 37. No. 4. P. 552-579.
9. Zhao S. et al. Tp-tio: A robust thermal-inertial odometry with deep thermalpoint. *2020 IEEE/RSJ International*

- Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2020. P. 4505-4512.
10. Sánchez-Ibáñez J. R., Pérez-del-Pulgar C. J., García-Cerezo A. Path planning for autonomous mobile robots: A review. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 23. P. 7898.
 11. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 1985. Vol. 2. P. 500-505.
 12. Ge S.S., Cui Y.J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous robots*. 2002. Vol. 13. P. 207-222.
 13. Vadakkepat P., Tan K. C., Ming-Liang W. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning. *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00*. IEEE. 2000. Vol. 1. P. 256-263.
 14. Zhou Z. et al. Tangent navigated robot path planning strategy using particle swarm optimized artificial potential field. *Optik*. 2018. Vol. 158. P. 639-651.
 15. Borenstein J. et al. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*. 1991. Vol. 7. No. 3. P. 278-288.
 16. Ulrich I., Borenstein J. VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots. *Proceedings. 1998 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 1998. Vol. 2. P. 1572-1577.
 17. Ulrich I., Borenstein J. VFH/sup*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification. *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2000. Vol. 3. P. 2505-2511.
 18. Ng J., Bräunl T. Performance comparison of bug navigation algorithms. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2007. Vol. 50. P. 73-84.
 19. Fox D., Burgard W., Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 1997. Vol. 4. No. 1. P. 23-33.
 20. Cao Y., Nor N.M. An improved dynamic window approach algorithm for dynamic obstacle avoidance in mobile robot formation. *Decision Analytics Journal*. 2024. Vol. 11. P. 100471.
 21. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Two methods of local navigation of mobile robots in static environments with obstacles. *Proceedings of the XII multiconference on management problems (MCPU-2019)*. 2019. P. 105-107 (in Russian).
 22. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Issues of motion control of mobile robots based on the potential guidance method. *Mechatronics, automation, control*. 2019. Vol. 20. No. 11. P. 677-685 (in Russian).
 23. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Kozhin M.A. Analysis of modified bug algorithm in mobile robot local navigation problem. *Mechatronics, automation and robotics*. 2021. No. 7. P. 4-8 (in Russian).
 24. Kozhin M.A. Potential control strategy of mobile robot in dynamic environment. *Mechatronics, automation and robotics*. 2023. No. 12. P. 26-32 (in Russian).
 25. Kozhin M.A., Filimonov N.B. Potential control of mobile robot in environment with dynamic obstacles based on modified bug algorithm. *High Performance Computing Systems and Technologies*. 2024. Vol. 8. No. 1. P. 189-195 (in Russian).

Mikhail A. Kozhin

PhD student, Faculty of Physics
Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: kojinn@mail.ru

Nikolay B. Filimonov

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Faculty of Physics
Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
Phone: +7-916-514-71-02,
E-mail: nbfilimonov@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ КОНSENSУСА МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье представлен обзор современного состояния, проблемы консенсуса в мультиагентных системах (МАС). Рассматривается ретроспектива исследований проблемы консенсуса, описываются линейные и нелинейные модели агентов, а также паттерны их взаимодействия. Проведен анализ типичных задач консенсуса: консенсус без лидера, консенсус типа лидер-последователь и проектирование консенсуса в гетерогенных системах. Особое внимание уделяется проблеме консенсуса в условиях коммуникационных ограничений, исполнительных механизмов и консенсус на основе событийных механизмов. В статье обсуждается применение консенсуса МАС в групповых мобильных роботах, сенсорных сетях и интеллектуальных энергосетях.

Ключевые слова: мультиагентные системы, проблема консенсуса, распределенное управление, отказоустойчивое управление, коммуникационные ограничения, консенсус с событийным управлением.

Введение

В эпоху цифровой и интеллектуальной технологической трансформации, традиционные централизованные методы управления сложными системами сталкиваются с беспрецедентными вызовами. От автономных транспортных колонн до роев микророботов, от интеллектуальных энергосетей до распределенных вычислительных сред — сложность, динамизм и масштаб этих систем превосходят возможности единого центра управления. В этом контексте мультиагентные системы (МАС), как инновационная распределенная парадигма управления, благодаря своей адаптивности, отказоустойчивости и масштабируемости, стали одним из наиболее динамично развивающихся направлений исследований в теории управления за последние два десятилетия [1, 2].

С концептуальной точки зрения, агент определяется как система, обладающая рядом ключевых характеристик: хотя бы частичной автономностью, способностью воспринимать окружающую среду, коммуникационными возможностями и вычислительными способностями [3]. Мультиагентная система представляет собой сетевую структуру таких интеллектуальных единиц, где агенты через локальные взаимодействия совместно выполняют глобальные задачи, непосильные для отдельного агента [4]. С математической перспективы, мультиагентные системы обычно характеризуются тремя фундаментальными компонентами: уравнениями состояния, топологией взаимодействия и протоколами управления.

В исследованиях мультиагентных систем проблема консенсуса (согласования) занимает, несомненно, центральное место. Сущность этой проблемы заключается в разработке распределенных протоколов, позволяющих всем агентам в системе достичь согласия относительно определенного состояния посредством обмена исключительно локальной информацией. С математической точки зрения, формальное определение консенсуса формулируется следующим образом: существование распределенного протокола, обеспечивающего выполнение условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0, \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\},$$

где N - количество агентов в МАС, $x_i(t)$ - состояние i -го агента в момент времени t [5]. В зависимости от динамических характеристик агентов (линейные или нелинейные системы), структуры сетевой топологии (фиксированная или изменяющаяся) и конечного значения сходимости (консенсус по среднему, взвешенный консенсус или консенсус по заданному значению), задача консенсуса классифицируется на множество вариантов, каждая из которых сопряжена с различными теоретическими вызовами и практическими сценариями применения.

Исследования консенсуса в мультиагентных системах ведут своё происхождение в работах DeGroot в 1970-х годах, затем развивались через исследования Tsitsiklis в области распределенных вычислений, и в начале 2000-х годов были интегрированы в теорию управления благодаря пионерским работам Jadbabaie и соавторов [6]. Впоследствии Olfati-Saber и Murray [7] разработали теоретическую основу консенсуса на базе теории графов и матриц Лапласа, а Ren и Beard [8] расширили эту структуру на направленные переключающиеся топологии. В последние годы исследо-

вательские тенденции смещаются к более сложным и практическим сценариям, включая событийно-управляемый контроль и координацию гетерогенных систем [9, 10].

Анализ и проектирование алгоритмов консенсуса требуют применения различных математических инструментов. Теория неотрицательных матриц, в частности, теорема Перрона-Фробениуса, обеспечивает анализ сходимости алгоритмов консенсуса. Теория устойчивости Ляпунова применяется с типичными функциями вида $V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j - x_i)^2$ или $V(x) = x^T L x$, где L

- матрица Лапласа графа. Спектральная теория графов связывает собственные значения матрицы Лапласа со скоростью сходимости и устойчивостью алгоритмов, при этом алгебраическая связность становится ключевым показателем эффективности и робастности системы.

Практическая ценность алгоритмов консенсуса нашла широкое практическое применение в ряде областей. В робототехнических системах эти алгоритмы реализуют распределение задач и управление формациями; в сенсорных сетях они повышают точность оценки параметров; в интеллектуальных энергосетях технологии консенсуса решают задачи экономической диспетчеризации; а в науке о данных применяются для распределенной кластеризации [11, 12].

Настоящий обзор имеет своей целью систематизировать современное состояние исследований, теоретические основы и перспективы применения проблемы консенсуса в мультиагентных системах. В настоящей работе обсуждаются следующие ключевые составляющие проблемы консенсуса МАС: математические модели агентов (линейные и нелинейные системы) и модели группового взаимодействия; типичные задачи консенсуса и методы управления, в том числе консенсус без лидера, консенсус лидер-последователь и проектирование консенсуса в гетерогенных системах; проблемы консенсуса в условиях ограничений, охватывающие коммуникационные ограничения (временные задержки в каналах связи, потери данных), ограничения исполнительных механизмов (насыщение, отказы) и консенсус на основе событийных механизмов; а также применения технологий консенсуса мультиагентных систем в робототехнике, сенсорных сетях и интеллектуальных энергосетях. **Данная статья должна способствовать формированию у читателей комплексного понимания проблемы консенсуса и определению перспективных направлений развития данной области.**

Модели агентов и их взаимодействия как проблема консенсуса в МАС

Для математического описания МАС и разработки алгоритмов консенсуса необходимо формализовать как динамику отдельных агентов, так и структуру их взаимодействий. Выбор подходящих моделей оказывает детерминирующее воздействие на сложность анализа, вычислительные затраты и практическую применимость результирующих алгоритмов. В данном разделе рассматриваются основные математические модели, используемые при исследовании проблемы консенсуса: линейные и нелинейные модели агентов, а также формализация топологии взаимодействия между ними.

Линейные модели агентов представляют собой фундаментальный класс математических абстракций, лежащих в основе многих алгоритмов консенсуса. Для формального описания динамики агентов в МАС используются различные линейные модели, охватывающие спектр от элементарных до комплексных структур. Наиболее фундаментальной формой является интегратор первого порядка, описываемый дифференциальным уравнением: $\dot{x}_i = u_i$, где $\dot{x}_i \in R^n$ - состояние агента i , $u_i \in R^n$ - управляющее воздействие, а n - размерность пространства состояний. Данная модель, благодаря своей аналитической прозрачности, нашла широкое применение в исследованиях базовых алгоритмов консенсуса, особенно в контексте задач согласования мнений и кластеризации данных. Следующим уровнем абстракции выступает интегратор второго порядка, характеризующийся уравнениями: $\ddot{x}_i = u_i$. Эта модель критически важна для систем, требующих контроля ускорения, таких как беспилотные летательные аппараты или наземные роботы. Обобщением предыдущих моделей выступает линейная стационарная система, формализуемая как:

$$\dot{x}_i = Ax_i + Bu_i, \quad y_i = Cx_i + Du_i,$$

где A, B, C, D - матрицы соответствующих размерностей, а y_i - выход системы. Данная модель предоставляет гибкий математический аппарат для описания широкого спектра физических систем с линейной динамикой.

Нелинейные модели агентов расширяют аналитический инструментарий исследователя, позволяя охватить более разнообразные классы практических систем, чья динамика не поддается линейной аппроксимации. В этом контексте особое место занимает динамика систем Лагранжа, описывающая широкий класс механических систем. Её компактная математическая форма:

$$D_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) = u_i,$$

где D_i - матрица инерции, C_i - матрица Кориолисовых и демпфирующих сил, а G_i - вектор потенциальных сил. Данная модель эффективно применяется для описания роботов-манипуляторов, космических аппаратов и других механических систем, участвующих в задачах координированного управления. Для неголономных мобильных роботов характерна модель одноколесного робота:

$$\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i,$$

$$\dot{y}_i = v_i \sin \theta_i,$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i,$$

где (x_i, y_i) - координаты, $\theta_i \in R$ - угол направления, а v_i и ω_i - линейная и угловая скорости соответственно. Данная модель учитывает кинематические ограничения, присущие колесным роботам, и является краеугольным камнем в исследованиях формаций мобильных агентов. В контексте биологически инспирированных МАС особую значимость приобретает модель Курамото, описывающая динамику связанных осцилляторов:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + K \cdot \sum_{i,j} \sin(\theta_j - \theta_i),$$

где ω_i - собственная частота, а K - коэффициент связи. Данная модель находит применение в анализе синхронизации биологических и искусственных систем, от нейронных сетей до энергетических микрогридов.

Модели взаимодействия агентов формализуют структуру коммуникаций в МАС и играют определяющую роль в исследовании алгоритмов консенсуса. Взаимодействия между агентами элегантно описываются графом $G = (V, E)$, где V - множество из n узлов (агентов), а E - множество рёбер (каналов связи). Ключевыми характеристиками графа, используемыми при анализе консенсуса, являются матрица смежности $A = \{[a_{ij}]\}$, где $a_{ij} \neq 0$, если $(j, i) \in E$, и матрица Лапласа

$L = D_{in} - A$, где $D_{in} = \text{diag}[d_1^{in}, \dots, d_n^{in}]$ - диагональная матрица входящих степеней. Для неориентированного связного графа матрица Лапласа обладает рядом примечательных свойств: она симметрична и положительно полуопределена, а 0 является простым собственным значением L с соответствующим собственным вектором e (вектор из единиц). Второе наименьшее собственное значение $\lambda_2(L) > 0$ характеризует алгебраическую связность графа - параметр, непосредственно влияющий на скорость сходимости алгоритмов консенсуса. В контексте ориентированных графов, критическими топологическими свойствами выступают сильная связность (существует путь от любого узла к любому другому) и наличие направленного остовного дерева (существует узел, из которого достижимы все остальные). Для моделирования динамически изменяющихся топологий используются переключающиеся графы $G_{\sigma(t)}$, где $\sigma(t) : [0, \infty) \rightarrow P$ - кусочно-постоянная функция, выбирающая текущую топологию из конечного множества P возможных графов. Этот подход позволяет формализовать сценарии с нестабильными коммуникационными каналами или мобильными агентами, меняющими свою конфигурацию в пространстве.

Систематический сравнительный анализ моделей требует установления объективной теоретической структуры для оценки вычислительных характеристик различных математических моделей агентов в задачах консенсуса МАС. Выбор подходящей модели агента непосредственно влияет на сложность анализа алгоритмов, их вычислительную эффективность и практическую реализуемость. Ниже приведенная Таблица представляет сравнение основных, используемых в МАС, моделей агентов на основе количественных показателей теории вычислительной сложности, охватывающих сложность математического моделирования, требования к вычислениям в реальном времени и типичные инженерные сценарии их применения. Данный сравнительный анализ предоставляет исследователям теоретическую основу для выбора модели, способствуя нахождению оптимального баланса между математической строгостью и простотой реализации.

В анализе сложности мы используем нотацию большого **O** для характеристики тенденций роста производительности алгоритмов в крупномасштабных системах. Сложность модели отражает теоретическую трудность математического описания и потребности в аналитических инструментах, вычислительная сложность характеризует сложность алгоритма для одного цикла управления. В анализе используются следующие ключевые параметры: d_i обозначает количество соседей агента i в топологии коммуникаций, p представляет размерность пространства состояний отдельного агента.

Проведенный теоретический анализ позволяет выявить следующие вычислительные характеристики различных типов моделей агентов МАС: *простые динамические модели* (со сложностью $O(1)$) имеют узкое вычислительное место в обработке соседних коммуникаций, причем здесь объём вычислений линейно растёт с сетевой связностью; *модели средней сложности* (со сложностью $O(p)$ и $O(p^2)$) достигают баланса между обработкой внутренних состояний и сетевыми коммуникациями; *сложные динамические модели* ($O(p^3)$) имеют вычислительные затраты, связанные в основном с внутренними динамическими вычислениями. Следуя данному анализу, в практических приложениях следует выбирать модели $O(1)$ или $O(p)$ для обеспечения ее масштабируемости, а модели $O(p^2)$ или $O(p^3)$ - для обеспечения ее точности описания. При этом модели с подходящей вычислительной сложностью следует выбирать согласно ограничениям реального времени и аппаратных ресурсов.

Таблица

Количественное сравнение производительности моделей агентов

Тип модели агента	Сложность модели	Вычислительная сложность (за шаг)	Типичные области применения
Интегратор первого порядка	$O(1)$	$O(d_i)$	Распределённое оценивание параметров, слияние сенсорных сетей
Интегратор второго порядка	$O(1)$	$O(d_i)$	Управление формациями, координированное планирование маршрутов
Линейные системы высшего порядка	$O(p^2)$	$O(p^2 d_i)$	Аэрокосмические системы, прецизионное производство
Лагранжевы системы	$O(p^3)$	$O(p^3)$	Роботизированная кооперация, космические операции
Системы с неголономными ограничениями	$O(p)$	$O(p d_i)$	Наземные мобильные платформы, автономная навигация
Модель Курамото	$O(1)$	$O(d_i)$	Синхронизация электросетей, сети осцилляторов

Такой системный анализ характеристик сложности может служить руководством для инженерного проектирования МАС: в иерархических архитектурах можно принимать модели соответствующей сложности на различных уровнях; в гибридных системах можно выбирать подходящие математические описания в соответствии с характеристиками подсистем; в средах с ограниченными ресурсами можно прогнозировать узкие места производительности системы через анализ сложности и разрабатывать соответствующие стратегии оптимизации.

Типичные задачи консенсуса при управлении МАС

Основываясь на глубоком понимании моделей агентов и механизмов их взаимодействия, мы теперь обратимся к рассмотрению типичных задач консенсуса в мультиагентных системах и соответствующих методов управления. Эти задачи, в зависимости от структуры системы и целей управления, можно разделить на три основные категории: консенсус без лидера, консенсус лидер-

последователь и консенсус в гетерогенных системах, каждая из которых имеет свою уникальную математическую формулировку и сферу применения.

Консенсус без лидера [13] представляет собой фундаментальную парадигму координации в МАС, где автономные агенты коллективно достигают согласованного состояния исключительно посредством локальных взаимодействий, не полагаясь на централизованное управление. Здесь классический протокол пропорционального управления выражается формулой:

$$u_i = -\alpha \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j).$$

При таком подходе динамика системы в целом может быть представлена в компактной форме: $\dot{x} = -\alpha Lx$, где L обозначает матрицу Лапласа графа взаимодействий. Примечательно, что для связного неориентированного графа данный алгоритм гарантирует асимптотическую сходимость состояний к единому консенсусному значению, которое определяется как средневзвешенное начальных состояний всех агентов.

Скорость конвергенции к консенсусу интимно связана со спектральными свойствами графа - конкретно, со вторым наименьшим собственным значением матрицы Лапласа, известным как алгебраическая связность. Высокая алгебраическая связность свидетельствует о робастной топологической структуре и обеспечивает ускоренную сходимость протокола.

Задача консенсуса лидер-последователь расширяет традиционную задачу консенсуса до задачи слежения, где часть или все последователи должны отслеживать состояние лидера. Эта структура более подходит для ориентированных на задачи приложений, таких как управление формациями и слежение за целью [14].

Для системы с фиксированным лидером протокол управления приобретает следующую форму:

$$u_i = -\alpha \cdot \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j) + g_{i0}(x_i - x_0) \right),$$

где g_{i0} индицирует наличие прямого информационного канала между агентом-последователем i и лидером. Концептуально важно, что определив ошибку слежения как $e = x - \mathbf{1}x_0$ можно показать, что динамика ошибки эволюционирует согласно уравнению:

$$\dot{e} = -\alpha \cdot (L + A)e + \mathbf{1}_n \otimes u_0.$$

Критически значимое наблюдение заключается в том, что при ненулевом управляющем воздействии лидера u_0 возникает ненулевая ошибка установившегося режима. Для элиминации этого нежелательного эффекта разработаны усовершенствованные стратегии, в частности, пропорционально-интегральное управление:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -k_p \cdot (L + A)(x - \mathbf{1}x_0) - k_i \cdot (L + A)v, \\ \dot{v} &= (L + A)(x - \mathbf{1}x_0). \end{aligned}$$

Анализ проблем управляемости систем лидер-последователь и разработка наблюдателей состояния представляют собой активные направления исследований. Особую сложность представляет сценарий с множественными лидерами, требующий анализа структурной управляемости системы и механизмов разрешения потенциальных конфликтов между противоречивыми директивами различных лидеров.

Теоретико-графовый анализ выявляет, что для достижения консенсуса в системе лидер-последователь необходимо и достаточно, чтобы граф содержал остовное дерево, корнем которого является лидер. Это условие значительно слабее требования сильной связности, предъявляемого к системам без лидера.

Задача консенсуса в гетерогенных системах фокусируется на согласовании выходных сигналов агентов с различными моделями динамики. Поскольку размерности пространств состояний могут различаться, обычно требуется проектирование динамических или статических регуляторов с обратной связью по выходу [15, 16].

Структура динамического регулятора, реализующего принцип внутренней модели, имеет вид:

$$\dot{\xi}_i = D_i \xi_i + E_i y_i + F_i v_i, \quad \zeta_i = P_i \xi_i + Q y_i,$$

$$v_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t)(\zeta_j - \zeta_i), \quad u_i = G_i \xi_i + M_i y_i + O_i v_i,$$

где ξ_i - состояние регулятора, ζ_i - выход регулятора, v_i - входной сигнал взаимодействия.

Особая структура сложных сетей также значительно влияет на поведение консенсуса. В знаковых сетях, где между агентами существуют как кооперативные, так и конкурентные отношения, возможно возникновение бипартитного консенсуса (две противоположные группы достигают внутреннего согласия) или кластерного консенсуса (несколько групп достигают различных согласованных значений).

Бипартитный консенсус требует структурной сбалансированности сети, то есть множество узлов должно разделяться на два подмножества так, чтобы связи внутри подмножеств имели положительные веса, а между подмножествами - отрицательные. Для кластерного консенсуса необходимо выполнение межкластерного условия:

$$\sum_{j \in V_i} a_{ij} = s_{kl}, \quad \forall i \in V_k, \quad k, l = 1, \dots, q, \quad k \neq l,$$

где s_{kl} зависит только от индексов кластеров [17].

Для анализа нелинейных гетерогенных систем основными инструментами являются методы Ляпунова и теория сжатия, однако поиск подходящих функций и доказательство сходимости остаются значительные технические сложности.

Консенсус МАС в условиях ограничений

Существенное влияние на эффективность консенсуса МАС оказывают различные ограничения, связанные как с характеристиками коммуникационных каналов, так и с исполнительными механизмами агентов. В данном разделе рассмотрим ключевые результаты в области достижения консенсуса при наличии коммуникационных ограничений (временные задержки в каналах связи), ограничений исполнительных механизмов (насыщение актуаторов и наличие отказов) и консенсус на основе событийных механизмов в условиях ограниченных ресурсов. Каждый из этих факторов представляет собой уникальный вызов для проектирования и анализа алгоритмов консенсуса, требующий специализированных методов и подходов.

Временные задержки в каналах связи существенно влияют на консенсус МАС. Математическая модель системы с задержками может быть представлена как:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} [x_j(t - \tau) - x_i(t - \tau)],$$

где τ - время задержки. Согласно результатам исследований [18], консенсус может быть достигнут при условии $\tau \in \left[0, \frac{\pi}{2\lambda_{\max}(L)}\right]$, где $\lambda_{\max}(L)$ - максимальное собственное значение матрицы Лапласа.

Альтернативная оценка верхней границы задержки $\tau \leq \frac{\pi}{4d_{\max}(G)}$ демонстрирует, что чем выше максимальная степень вершин графа, тем ниже устойчивость МАС к задержкам.

Для систем с неоднородными задержками в каналах связи и переключающейся топологией проблема усложняется. В работе [19] рассматривается система:

$$\dot{x}_i(t) = -\sum_{j=1}^n a_{ij}^{\sigma(t)} k_{ij} [x_i - T_{ij}(x_j)],$$

где T_{ij} - оператор задержки. Показано, что консенсус достигается для произвольных ограниченных неоднородных постоянных, переменных или распределенных задержек, если топология сети имеет совместно направленное остоное дерево.

Насыщение исполнительных механизмов является важным аспектом ограниченности исполнительных механизмов в МАС [9]. Для систем с динамикой:

$$\dot{x}_i = Ax_i + B\delta_{\Delta}(u_i), \quad i = 1, \dots, N,$$

где $\delta_{\Delta}(u) = \text{sgn}(u) \min\{|u|, \Delta\}$ - функция насыщения, разработаны два основных подхода:

1. Полуглобальное управление консенсусом с использованием техники низкокоэффициентной обратной связи:

$$u_i(t) = K \cdot \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)),$$

где $K = B^T P(\varepsilon)$, а $P(\varepsilon)$ определяется из параметрического уравнения Риккати.

2. Глобальное управление консенсусом, где для МАС с двойными интеграторами эффективен нелинейный подход:

$$u_i = -\sum_{j=1}^N a_{ij} \tanh(K_x(x_i - x_j)) - \sum_{j=1}^N b_{ij} \tanh(K_v(v_i - v_j)).$$

Отказы исполнительных механизмов обычно моделируются как:

$$u_{0i}(t) = \rho_i(t)u_{ih}(t) + r_i(t), \quad t \geq t_{if},$$

где $\rho_i(t) \in (0,1]$ - индикатор исправности, $r_i(t)$ - смещение. Применяются методы отказоустойчивого управления, которые различают пассивные (PFTC) и активные (AFTC) методы. PFTC использует робастные регуляторы с фиксированными параметрами, тогда как AFTC включает обнаружение отказов и реконфигурацию управления. Адаптивный подход:

$$u_i(t) = -\hat{K}_i(t) \cdot \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)),$$

где $\hat{K}_i(t)$ обновляется в соответствии с оценкой состояния отказа, демонстрирует высокую эффективность в таких условиях.

Событийно-управляемый консенсус в условиях ограниченных ресурсов представляет собой альтернативу традиционным методам управления, основанным на периодической передаче данных, которые часто неэффективны при ограниченных коммуникационных и вычислительных ресурсах. В этом подходе обновление контроллера происходит только при выполнении определенных условий [20, 21].

Основные элементы событийно-управляемого консенсуса включают различные формы ошибки измерения: тривиальная форма выражается как $e_i(t) = x_i(t_k^i) - x_i(t)$, для временного интервала $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$; комбинационная форма определяется как $e_i(t) = q_i(t_k^i) - q_i(t)$, где $q_i(t)$ представляет взвешенную сумму различий состояний соседей $\sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t))$; модельно-ориентированная форма использует $e_i(t) = e^{A(t-t_k^i)} x_i(t_k^i) - x_i(t)$, вводя прогнозирование на основе динамических характеристик системы.

Условия срабатывания определяют время и частоту обновления контроллера: независимое от состояния условие использует затухающую функцию $c_i + d_i e^{-\alpha_i t}$ с параметрами $c_i + d_i > 0$, обеспечивая базовый механизм срабатывания, не зависящий от состояния системы; зависимое от состояния условие использует различия состояний соседей $\beta_i \left| \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \right|$ в качестве порогового значения, что делает обновления управления напрямую реагирующими на изменения состояния системы; гибридное условие объединяет особенности обоих подходов, обеспечивая более гибкую стратегию срабатывания, которая гарантирует базовую частоту обновлений при учете изменений состояния системы.

Критическим аспектом при проектировании событийно-управляемых систем является исключение эффекта Зенона – ситуации бесконечного числа событий в конечном временном интервале. Для этого используются различные методы, включая введение минимального временного интервала между событиями или использование пороговых функций с положительной нижней границей.

Периодические событийно-управляемые алгоритмы представляют собой компромисс между непрерывным мониторингом и событийным управлением. Момент срабатывания определяется как:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + h \inf \{ l : |e_i(t_k^i + lh)| > \beta_i |z_i(t_k^i + lh)| \},$$

где $h > 0$ - период дискретизации. Такой подход естественным образом исключает эффект Зенона и снижает вычислительные затраты.

Самоиницируемое управление является развитием событийного подхода, где следующий момент срабатывания вычисляется заранее на основе текущего состояния системы, что позволяет избежать непрерывного мониторинга. Хотя это снижает частоту обновления данных, точность расчета времени срабатывания оказывает влияние на эффективность алгоритма.

Для анализа производительности консенсусных алгоритмов в условиях ограничений используются различные показатели: скорость сходимости, определяемая через минимальное отрицательное действительное собственное значение матрицы Лапласа; робастность к возмущениям, характеризующая способность системы сохранять близость к консенсусу при наличии ограниченных внешних воздействий; энергетическая эффективность, критичная для беспроводных сенсорных сетей; и адаптивность к изменениям топологии, важная в динамических средах.

Применение и перспективы развития методов консенсуса в МАС управления

Практическая ценность алгоритмов консенсуса проявляется в широком спектре технических приложений, демонстрируя многогранность и адаптивность данного подхода к различным прикладным задачам.

В многоробототехнических системах алгоритмы консенсуса трансформируют концепцию коллективного управления. В системах наземных роботов технологии консенсуса позволяют формировать динамические формации, адаптирующиеся к изменениям окружающей среды, и координировать коллективный транспорт габаритных объектов, что критически важно в промышленной логистике.

Беспроводные сенсорные сети трансформируются благодаря алгоритмам консенсуса, позволяющим эффективно решать задачи распределённого оценивания параметров, обнаружения аномалий и синхронизации временных шкал. Эти алгоритмы обеспечивают вычисление оптимальных оценок без энергозатратной передачи всех измерений в центральный узел, что кардинально повышает энергоэффективность и отказоустойчивость системы.

В интеллектуальных энергосистемах распределённые алгоритмы консенсуса революционизируют процессы экономической диспетчеризации, оптимизируя распределение нагрузки между генераторами при соблюдении баланса мощности в сети. Для транспортных систем алгоритмы консенсуса становятся основой интеллектуального управления трафиком, минимизируя заторы и повышая безопасность движения.

Несмотря на значительные достижения, область консенсуса мультиагентных систем сталкивается с рядом фундаментальных вызовов. В теоретической плоскости актуальными остаются проблемы построения унифицированной архитектуры для крупномасштабных гетерогенных систем и разработки моделей, адекватно отражающих нелинейную динамику и стохастические возмущения. Критическим аспектом является обеспечение оптимального баланса между вычислительной сложностью алгоритмов и качеством управления. Перспективным вектором развития становится интеграция методов распределённого машинного обучения с алгоритмами консенсуса, открывающая возможности для создания самоадаптивных стратегий управления.

В прикладной сфере ключевыми направлениями являются разработка методов координации в сложных гетерогенных системах, включающих как технические, так и человеческие элементы, а также создание систем распределённых вычислений на границе сети для мультиагентных систем с ограниченными ресурсами.

Таким образом, теория консенсуса в мультиагентных системах управления представляет собой не только динамично развивающееся научное направление, но и мощный инструмент технологических инноваций с колоссальным потенциалом для дальнейшего развития и интеграции в различные отрасли современной техники.

Заключение

В настоящей работе был представлен обзор состояния и перспектив проблемы консенсуса мультиагентных систем управления. Проведённое исследование показывает, что алгоритмы консенсуса эволюционировали от теоретических концепций к практическим решениям. Рассмотрен-

ные математические модели агентов, механизмы их взаимодействия, классические задачи консенсуса и задачи консенсуса в условиях различных ограничений демонстрируют теоретическую глубину и прикладную ценность данного направления исследований.

В реальных технических системах, от многоробототехнических комплексов до интеллектуальных энергосетей, распределённые алгоритмы консенсуса проявляют значительные преимущества. Несмотря на достигнутые успехи, создание единой теоретической базы для крупномасштабных гетерогенных систем и оптимизация вычислительной сложности алгоритмов остаются нерешёнными проблемами. Будущие исследования необходимо ориентировать на интеграции технологий машинного обучения с алгоритмами консенсуса и разработке эффективных стратегий координации в сложных социотехнических системах, что откроет новые перспективы применения мультиагентных технологий для решения актуальных задач современного общества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination // *Transactions on Industrial informatics*. 2013, Vol. 9, No. 1. P. 427–438.
2. Olfati-Saber R., Fax J.A., Murray R.M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems // *Proceedings of the IEEE*. 2007, Vol. 95, No. 1. P. 215–233.
3. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 28573–28593.
4. Qin J., Gao H., Zheng W.X. Exponentially synchronization of complex networks of linear systems and non-linear oscillators: a unified analysis // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015. Vol. 26. No. 3. P. 510–521.
5. Ren W., Beard R.W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control // *Springer*, 2008. Vol. 27. No. 2. P. 71–82.
6. Jadbabaie A., Lin J., Morse A.S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2003. Vol. 48. No. 6. P. 988–1001.
7. Olfati-Saber R., Murray R.M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2004. Vol. 49. No. 9. P. 1520–1533.
8. Ren W., Beard R.W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. Vol. 50. No. 5. P. 655–661.
9. Yang P., Zhang A., Bi, W. Finite-time group consensus for second-order multi-agent systems with input saturation. // *Neural Processing Letters*. 2022. Vol. 54. No. 5. P. 4211–4228.
10. Wang M., Zhao C., Xia J., Sun J. Periodic event-triggered robust distributed model predictive control for multiagent systems with input and communication delays // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2023. Vol. 19. No. 11. P. 11216–11228.
11. Yang S., Tan S., Xu J.-X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013. Vol. 28. No. 4. P. 4416–4426.
12. Qin J., Fu W., Gao H., Zheng W.X. Distributed k-means algorithm and fuzzy c-means algorithm for sensor networks based on multi-agent consensus theory // *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2016. Vol. 47. No. 3. P. 772–783.
13. Ян Ш. Распределённое оптимальное управление мультиагентными системами // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024. No. 40. P. 36–42.
Yang Sh. Optimal consensus control of multi-agent systems // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024. No. 40. P. 36–42.
14. Ян Ш. О достижимости консенсуса в мультиагентных системах управления с лидером // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025. Vol. 13. No.1. 9 с.
Yang Sh. On achievability of consensus in multi-agent control systems with a leader // *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025. Vol. 13. No. 1. 9 p.
15. Niu Y., Yang Y., Niu B., Zhao X., Zhai L., Zhang B. Robust consensus tracking strategy of heterogeneous nonlinear multi-agent systems with time-varying input delays // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2023. Vol. 21. No. 4. P. 6299–6310.
16. Козьякин В.С., Кузнецов Н.А., Чеботарев П.Ю. Консенсус в асинхронных мультиагентных системах. I. Асинхронные модели консенсуса // *Автоматика и телемеханика*. 2019. Т. 80. № 4. С. 3–40.
Kozyakin V.S., Kuznetsov N.A., Chebotarev P.Y. Consensus in asynchronous multiagent systems. I. Asynchronous consensus models // *Automation and Remote Control*. 2019. Vol. 80. № 4. С. 593–623.
17. Li K., Ahn C. K., Hua C. Delays-based distributed bipartite consensus control of nonlinear multiagent systems with switching signed topologies // *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2023, Vol. 10. No. 4. P. 1895–1904.
18. Агаев Р.П., Хомутов Д.К. О граничном значении запаздывания и асимптотике непрерывного протокола консенсуса первого порядка // *Автоматика и телемеханика*. 2024. № 6. С. 83–96.
Agaev R. P., Khomutov D. K. On the boundary value of the time-delay and the asymptotic behavior of a continuous first-order consensus protocol // *Automation and Remote Control*. 2024. No. 6. P. 83–96.
19. Jiang W., Chen Y., Charalambous T. Consensus of general linear multi-agent systems with heterogeneous input and communication delays // *IEEE Control Systems Letters*. 2020. Vol. 5. No. 3. P. 851–856.
20. Dimarogonas D.V., Frazzoli E., Johansson K.H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems // *IEEE Transactions on automatic control*. 2011. Vol. 57. No. 5. P. 1291–1297.

21. Ju Y., Ding D., He X., et al. Consensus control of multi-agent systems using fault-estimation-in-the-loop: Dynamic event-triggered case // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2021. Vol. 9. No. 8. P. 1440-1451.

Ян Шуай

Аспирант каф. физико-математических методов управления, физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, Д. 1, стр. 2; Эл. почта: shuai.yang21@physics.msu.ru

Филимонов Николай Борисович

Д-р техн. наук, Профессор каф. физико-математических методов управления, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2, Тел.: +7-916-514-71-02, Эл. почта: nbfilimonov@mail.ru

Sh. YANG, N.B. FILIMONOV

CONSENSUS PROBLEMS IN MULTI-AGENT SYSTEMS: STATE AND PROSPECTS

This article presents a review of the current state of consensus problems in multi-agent systems (MAS). The retrospective of consensus problem research is examined, linear and nonlinear agent models are described, as well as patterns of their interaction. An analysis of typical consensus tasks is conducted: leaderless consensus, leader-follower type consensus, and consensus design in heterogeneous systems. Special attention is paid to the consensus problem under conditions of communication constraints, actuator mechanisms, and event-based consensus mechanisms. The article discusses the application of MAS consensus in group mobile robots, sensor networks, and intelligent power grids.

Keywords: multi-agent systems, consensus problem, distributed control, fault-tolerant control, communication constraints, event-triggered consensus.

REFERENCES

1. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *Transactions on Industrial informatics*. 2013. Vol. 9. No. 1. P. 427–438.
2. Olfati-Saber R., Fax J.A., Murray R.M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95. No. 1. P. 215–233.
3. Dorri A., Kanhere S.S., Jurdak R. Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 28573–28593.
4. Qin J., Gao H., Zheng W.X. Exponentially synchronization of complex networks of linear systems and nonlinear oscillators: a unified analysis. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015. Vol. 26. No. 3. P. 510–521.
5. Ren W., Beard R.W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control. *Springer*. 2008. Vol. 27. No. 2. P. 71–82.
6. Jadbabaie A., Lin J., Morse A.S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2003. Vol. 48. No. 6. P. 988–1001.
7. Olfati-Saber R., Murray R.M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2004. Vol. 49. No. 9. P. 1520–1533.
8. Ren W., Beard R.W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. Vol. 50. No. 5. P. 655–661.
9. Yang P., Zhang A., Bi W. Finite-time group consensus for second-order multi-agent systems with input saturation. *Neural Processing Letters*. 2022. Vol. 54. No. 5. P. 4211–4228.
10. Wang M., Zhao C., Xia J., Sun J. Periodic event-triggered robust distributed model predictive control for multiagent systems with input and communication delays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2023. Vol. 19. No. 11. P. 11216–11228.
11. Yang S., Tan S., Xu J.-X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013. Vol. 28. No. 4. P. 4416–4426.
12. Qin J., Fu W., Gao H., Zheng W.X. Distributed k-means algorithm and fuzzy c-means algorithm for sensor networks based on multi-agent consensus theory. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2016. Vol. 47. No. 3. P. 772–783.
13. Yang Sh. Optimal consensus control of multi-agent systems. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2024. No. 40. P. 36–42.
14. Yang Sh. On achievability of consensus in multi-agent control systems with a leader. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025. Vol. 13. No. 1. 9 p.
15. Niu Y., Yang Y., Niu B., Zhao X., Zhai L., Zhang B. Robust consensus tracking strategy of heterogeneous nonlinear multi-agent systems with time-varying input delays. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2023. Vol. 21. No. 4. P. 6299–6310.
16. Kozyakin V.S., Kuznetsov N.A., Chebotarev P.Y. Consensus in asynchronous multiagent systems. I. Asynchronous consensus models. *Automation and Remote Control*. 2019. Vol. 80. No. 4. P. 593–623.
17. Li K., Ahn C.K., Hua C. Delays-based distributed bipartite consensus control of nonlinear multiagent systems with switching signed topologies. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2023. Vol. 10. No. 4. P. 1895–1904.

18. Agaev R.P., Khomutov D.K. On the boundary value of the time-delay and the asymptotic behavior of a continuous first-order consensus protocol. *Automation and Remote Control*. 2024. No. 6. P. 83-96.
19. Jiang W., Chen Y., Charalambous T. Consensus of general linear multi-agent systems with heterogeneous input and communication delays. *IEEE Control Systems Letters*. 2020. Vol. 5. No. 3. P. 851-856.
20. Dimarogonas D.V., Frazzoli E., Johansson K.H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems. *IEEE Transactions on automatic control*. 2011. Vol. 57. No. 5. P. 1291-1297.
21. Ju Y., Ding D., He X., et al. Consensus control of multi-agent systems using fault-estimation-in-the-loop: Dynamic event-triggered case. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2021. Vol. 9. No. 8. P. 1440-1451.

Shuai Yang

Postgraduate,
Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory, 1/2, 119991, Moscow, Russia
E-mail: e-mail: shuai.yang21@physics.msu.ru

Nikolay B. Filimonov

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Faculty of Physics
Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
Phone: +7-916-514-71-02,
E-mail: nbfilimonov@mail.ru

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ ПО ШАБЛОНУ

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстовых редакторов Microsoft Word for Windows версий формата doc, docx, либо TEX (LATEX). В редакцию необходимо представить статью на магнитном носителе (флеш-карта, CD/DVD-диск) или по e-mail: Jordan@phys.asu.ru, а также предоставить твердую копию в 2 экземплярах (с подписями авторов в конце статьи). Статья должна быть оформлена в строгом соответствии с требованиями редакции; рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи.

Подготовку печатной продукции значительно ускоряет и упрощает использование шаблонов, содержащих описание стилей различных элементов статьи. Ниже приводится описание стилей шаблона для редактора Word for Windows последних версий. Требования для подготовки статей с использованием LATEXа будут опубликованы позднее.

Электронный вариант шаблона статьи можно получить, отправив соответствующий запрос на имя гл. редактора журнала «Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии» Иордана Владимира Ивановича по e-mail: Jordan@phys.asu.ru, либо скачать шаблон через Интернет: <http://conf-asu.ru/hpcst/>. Кроме того, электронный вариант шаблона статьи можно получить в редакции журнала по адресу:

656049, г. Барнаул, пр-т Красноармейский, 90, редакция журнала «Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии» (каб. 210). С вопросами обращаться к гл. редактору журнала Иордану Владимиру Ивановичу.

1. Размер бумаги и поля

Настройте параметры страницы в меню «Файл». Выберите размер бумаги A4, ориентация книжная (портрет). Установите следующие размеры полей: верхнее – 2,7 см; нижнее – 2,0 см; внутри – 2,0 см; снаружи – 2,5 см; переплет – 0 см. Включите опцию «Зеркальные поля». Расстояние от края до верхнего колонтитула – 2,0 см; до нижнего – 1,0 см. Полоса набора текста (без колонтитулов) при этом должна иметь размеры 25×16,5 см.

Обращаем внимание авторов на то обстоятельство, что размещение текста на странице зависит от разрешения установленного в системе принтера, поэтому перед окончательной (чистой) версткой статьи необходимо установить в качестве принтера по умолчанию лазерный принтер, настроенный на разрешение 600 dpi.

2. Шрифт

Основной текст статьи должен быть напечатан шрифтом Times New Roman размером 11 пунктов, межстрочный интервал – «Минимум 11 пт.». Величина шрифта, необходимость выделения полужирным, курсивом и пр., а также формат абзацев для различных элементов статьи указаны в следующем разделе. Все неуказанные параметры форматирования должны быть равны нулю. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol и Wingdings), а также полученных штатными средствами редактора формул, таблиц и рисунков.

3. Оформление элементов статьи

Перед оформлением статьи полезно пролистать последние номера журнала для ознакомления со стилем оформления статей, принятым в журнале.

ИНДЕКС УДК: РАЗМЕР ШРИФТА – 9 ПУНКТОВ, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ, ОТСТУП ПЕРВАЯ 0.

АВТОРЫ: 9 ПУНКТОВ, КУРСИВ, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ.
ОТСТУП ПЕРВАЯ 0, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЦЕНТРУ,
ИНТЕРВАЛ ПЕРЕД 6 ПУНКТОВ, БЕЗ ПЕРЕНОСА СЛОВ

ЗАГОЛОВОК1: 11 ПУНКТОВ, ПОЛУЖИРНЫЙ, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ. ОТСТУП ПЕРВАЯ 0, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЦЕНТРУ. ИНТЕРВАЛ ПЕРЕД 6 ПУНКТОВ, ПОСЛЕ – 9 ПУНКТОВ, БЕЗ ПЕРЕНОСА СЛОВ

Аннотация (от 1000 до 1500 знаков): 9 пунктов. Отступ слева 1 см, первая строка отступ 0,8 см, межстрочный "Минимум 10 пт.". Интервал после 9 пунктов. Затем заголовок **Ключевые слова:** полужирным курсивом, далее список слов (от 5 до 10): 9 пунктов. Отступ слева 1 см, первая строка отступ 0,8 см, межстрочный "Минимум 10 пт.". Интервал после 9 пунктов.

Заголовок2: 11 пунктов, полужирный. Отступ первая 0, выравнивание по центру. Интервал перед 9, после 6. Не разрывать абзац, не отрывать от следующего, без переноса слов

Заголовок3: 11 пунктов, разреженный на 2 пт. Отступ первая 0, выравнивание по центру. Интервал перед 9, после 6. Не разрывать абзац, не отрывать от следующего, без переноса слов

Основной текст (обычный): 11 пунктов, межстрочный интервал «Минимум 11 пт.». Отступ первая 0,8 см, запрет висячих строк. Курсивом должны быть выделены буквы латинского алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ($U_{пр}$, Φ_i , но Al_2O_3 , $\cos \alpha_i$, «BASF»). Векторы должны быть выделены полужирным курсивом. Греческие буквы пишутся прямым шрифтом!

Формула: первая строка отступ 0, интервал перед 2, после 2 пункта. Позиции табуляции – 8 см, выравнивание по центру; 16,5 см, выравнивание по правому краю.

Основной (обычный) без отступа: то же, что основной, но отступ первой строки равен 0 (чаще всего используется для продолжения фразы после формул и пр., где не нужен абзацный отступ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК-ЗАГОЛОВОК: 9 ПУНКТОВ, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ. ОТСТУП ПЕРВАЯ 0, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЦЕНТРУ, ИНТЕРВАЛ ПЕРЕД 6, ПОСЛЕ 6 ПУНКТОВ. МЕЖСТРОЧНЫЙ ИНТЕРВАЛ ОДИНАРНЫЙ

1. Библиографический список: 9 пунктов, выступ, первая строка отступ 0,8 см, межстрочный интервал одинарный. Нумерованный список с выравниванием текста списка вправо, от номера до текста 0,2 см.

Авторы в списке литературы (стиль шрифта, а не абзаца!): 9 пунктов, разреженный на 2 пункта.

Подписи к рисункам: 10 пунктов, отступ первая 0, межстрочный интервал «Минимум 10 пунктов».

После библиографического списка (на русском языке) через интервал 9 пунктов шрифтом 9 пунктов: сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность, место работы, адрес с указанием почтового индекса, телефон для связи, электронный адрес).

Далее через интервал 12 пунктов повторяются на английском языке: список авторов, название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список (REFERENCES), сведения об авторах с требованиями форматирования, аналогичными варианту на русском языке.

Электронный вариант шаблона копируется в папку с шаблонами MSOffice и используется следующим образом. Запустите редактор MSWord, выполните последовательность команд меню «Файл–Создать...», в открывшемся окне выберите название нашего шаблона. В созданном таким образом документе Вы сможете использовать подготовленные нами стили. Пишите статью, а затем оформите её, как описано ниже.

Если статья уже написана (есть файл со статьей), следует поступить так. Создайте документ с нашим шаблоном, как описано в предыдущем абзаце. Вставьте в этот документ файл со статьей с помощью последовательности команд меню «Вставка–Файл...». В открывшемся окне найдите имя файла со статьей, выделите его и нажмите кнопку «Ok».

Применить стили, предложенные в шаблоне, можно с помощью окна «Стиль» (обычно самое левое окно в панели форматирования). Поместите курсор в абзац, стиль которого необходимо изменить, и выберите название нужного стиля в прокручивающемся списке окна «Стиль». Применение стиля к авторам в списке литературы несколько отличается – вначале надо выделить фамилии и инициалы авторов, а затем применить соответствующий стиль.

Настройка редактора формул

Рекомендуем установить следующие значения в редакторе формул:

стиль	греческие (прописные и строчные) и символы – шрифт Symbol, остальные – шрифт Times New Roman, переменные – курсив, матрица-вектор – полужирный курсив;	
интервалы	120, 120, 100, 40, 25, 25, 100, 100, 35, 100, 1, 0,5, 0,25, 0,001, 100, 8, 2, 1,5, 45;	
размер	обычный	11 пт,
	крупный индекс	70%,
	мелкий индекс	50%,
	крупный символ	100%,
	мелкий символ	100%.

Предлагаемый способ, когда значения установлены в процентах, позволяет легко перенастраивать редактор формул на разные размеры символов, изменив одно лишь число – размер обычного символа.

Правила оформления рисунков

1. Иллюстрации должны быть предельно наглядными, графически выразительными, ясными, четкими.

Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления, надписей и принятых условных значений.

Количество рисунков должно быть, как правило, не более шести, включая рис. *a*, *б* и т.д.

Наиболее приемлемые **векторные** редакторы: Word, CorelDRAW, Excel, Visio, Origin.

Растровые изображения предпочтительны черно-белые, разрешение 600 dpi. Полутонные (фото) – 200 dpi. Принимаются графические форматы TIF, BMP, PCX, PNG. Формат JPEG **НЕЖЕЛАТЕЛЕН**.

2. Размеры рисунков зависят от их насыщенности информацией:

- простые рисунки (с минимальным количеством информации, т.е. 2–5 кривых) должны быть $\leq 5 \times 6$ см (± 1);
- сложные (много информации) могут быть большего размера, но с учетом того, чтобы рисунок и подпись располагались на одной странице. Максимальный размер рисунка в этом случае 165 (ширина) $\times$ 180 мм.

3. На векторных рисунках толщина осей – 0,7–1 пт., кривых – 1–1,5 пт. На растровых с разрешением 600 dpi толщина осей – 5–8, кривых – 8–12 (см. примеры ниже).

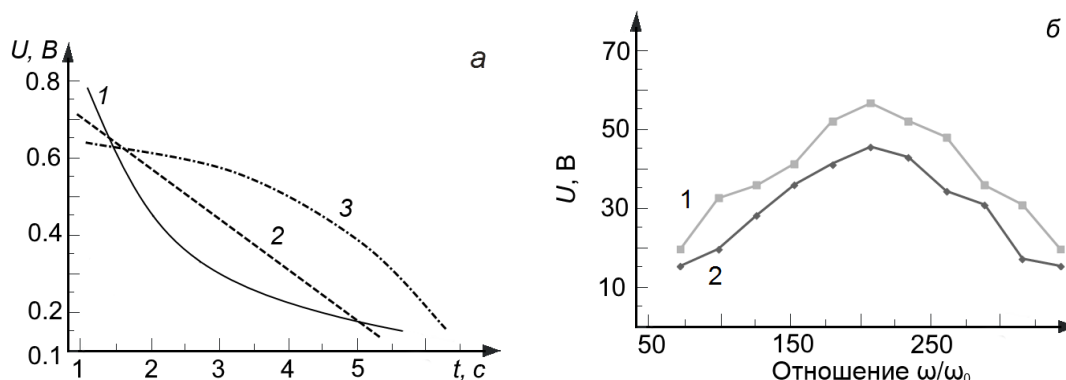
4. При наличии двух осей со шкалами рамка не нужна. Оси должны оканчиваться стрелками, риски на них располагаются вовнутрь. Как правило, на рисунке не должно быть сетки.

5. При пересечении кривых использовать разные стили линий: непрерывный, пунктирный, штрихпунктирный или отмечать разными маркерами: кружочками, треугольниками и т.д. Каждый элемент на иллюстрации должен быть обозначен цифрой или буквой. Во всех случаях обозначение элемента на каждой кривой пояснять в тексте.

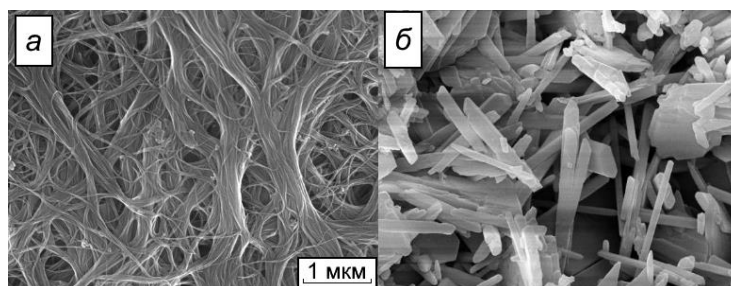
6. Надписи на рисунках должны быть выполнены шрифтом Arial на русском языке 9–10 пт., если рисунок дан в натуральную величину (по указанным выше размерам):

- нумерацию кривых (цифровую, буквенную) обозначать курсивом (наклонным шрифтом – 1, 2, ...; *a*, *б*, ...);
- физические величины на осях обозначать как в тексте: латинские – курсивом, греческие – прямым, векторы – полужирным без стрелок и т.д.;
- единицы измерения следует наносить в конце шкалы вместо последнего числа вместе с наименованием переменной величины. Физическая величина от единицы измерения отделяется запятой, а не скобками (напр., *T*, К). Развернутое наименование величины в тех случаях, когда нет его буквенного обозначения (напр., Время поляризации, мин) или если

обозначение физической величины занимает много места (напр., $G \cdot 10^5$, Дж/моль), помещают вдоль осей с прописной буквы отдельной строкой и отделяют от единицы величины запятой.



7. Если рисунок состоит из нескольких фото, напр., *а, б, в*, эти буквы (курсивные) желательно помещать в левом нижнем (верхнем) углу на белом фоне с рамкой. Масштаб следует располагать в правом нижнем углу на белом фоне без рамки.



8. Рисунки располагаются в тексте **всегда** после ссылки на них.

Может быть несколько вариантов компоновки рисунков:

- если ссылки на рисунки расположены близко друг к другу, то и рисунки располагаются рядом, при этом подпись – под каждым отдельно;
- если рисунок состоит из нескольких фрагментов (напр., *а, б, в*), то подпись располагается под всем рисунком.

9. При использовании редактора рисунков MS Word **НЕДОПУСТИМО** создание графических объектов в тексте статьи. Перед рисованием необходимо создать рисунок последовательно команд меню: Вставка → Объект → Рисунок Microsoft Word – и рисовать.

10. Подрисуточные подписи печатаются отдельно от рисунка шрифтом 10 пт. с прописной буквы, точка в конце подписи не ставится.

Для составных рисунков условия описания частей (*а, б, в, ...*) должны приводиться в подписи. Описание элементов рисунка (кривых на графиках, деталей на чертежах и схемах) предпочтительно помещать в тексте статьи, кроме случаев, когда подпись с описанием не превышает по объему 3–4-х строк.

11. Названия таблиц (и текст в них) печатаются шрифтом 10 пт. над таблицами с прописной буквы, точка в конце названия не ставится. Слово Таблица с номером печатается над названием и выравнивается по правому краю (если таблица одна, то номер не ставится).

12. Ссылки на цитируемую литературу даются в тексте цифрами в квадратных скобках, здесь же указываются цитируемые страницы: [1, с. 15; 2, с. 45]. Сам список литературы под заголовком "Библиографический список" приводится после основного текста в порядке цитирования (один пункт списка – одно наименование). Один и тот же источник в библиографическом списке указывается один раз, в тексте статьи при повторной ссылке указывается в квадратных скобках номер, который использовался первый раз. Оформляется библиографический список по ГОСТу Р 7.0.5–2008 следующим образом:

а) для периодических изданий даются фамилия и инициалы автора (авторов), название работы, полное или общепринятое сокращенное название журнала (или другого периодического издания), год, номер тома, выпуска (дата – для газеты);

б) для книг, монографий, учебников и учебных пособий – фамилия и инициалы автора (авторов), полное название источника, место издания, год издания;

в) для сборников научных статей и трудов конференций фамилия и инициалы автора (авторов), название конкретной работы, полное название источника (сборника), место издания, год издания;

г) ссылки на неопубликованные работы не допускаются;

д) если для цитируемого источника существует DOI (Digital Object Identifier), его следует указывать в конце источника после точки в следующем виде DOI: префикс/суффикс (*например*: DOI:10.14258/izvasu(2014)1.1-01).

13. Библиографический список должен содержать, как правило, не менее 10 источников, содержащих ссылки как на отечественные, так и на зарубежные монографии и статьи в ведущих научных журналах, дающие полное представление о современном состоянии исследований в данной области. Доля самоцитирования, ссылок на одного и того же автора и на один и тот же журнал не должна превышать 25%.

14. В авторской корректуре допускается лишь исправление ошибок набора и не разрешается вносить в текст другие изменения. Исправленный вариант статьи должен быть возвращен в издательство вместе с первоначальным. После работы корректора содержательные изменения текста не допускаются.

15. Предусмотрена оплата расходов на издание авторского экземпляра номера журнала, в котором публикуются статьи сотрудников АлтГУ и внешних организаций. Оплата производится безналичным расчетом. После решения редколлегии о публикации статьи автору высылается письмо с указанием точной суммы и банковских реквизитов. Расчет стоимости (вместе с НДС) за страницу формата А4 (1800 знаков с пробелами) указывается в договоре; при наличии неполных страниц их число округляется (менее половины страницы не засчитывается, более половины – считается за полную страницу). В оплату входит подготовка статьи к публикации.

Контакты: Публикации, оформленные по всем правилам, необходимо высылать (с рекомендацией, ключевыми словами и аннотациями, в электронном и распечатанном виде (с подписями всех авторов)) почтовым отправлением по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, Алтайский государственный университет, Институт «цифровых технологий, электроники и физики» (ИЦТЭФ), кафедра «вычислительной техники и электроники (ВТиЭ)», редакционная коллегия журнала "Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии", гл. редактору Иордану Владимиру Ивановичу. Местом фактического расположения подразделений ИЦТЭФ является адрес: пр-т Красноармейский, 90. Места работы гл. редактора и секретаря журнала расположены в каб. 210 кафедры ВТиЭ. Дополнительно можно обращаться к сотрудникам кафедры ВТиЭ (каб. 205 и 211). Тел. секретаря кафедры и редакции (каб. 210, 211): (3852) 29-66-44, тел. каб. 205: 29-66-48. E-mail гл. редактора журнала: jordan@phys.asu.ru, W.Jordan@mail.ru.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 9 · № 1 · 2025

Периодическое издание

Данный номер журнала содержит научные статьи по итогам 15-й Международной научно-практической конференции «Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии в научных исследованиях, автоматизации управления и производства (ВВСТ-2025)»

Редактирование и подготовка оригинал-макета *В.И. Иордан*

Оформление обложки *Д.А. Басманова*

ЛР 020261 от 14.01.1997.

Подписано в печать 09.07.2025. Дата выхода 16.07.2025.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24,61.

Тираж 100 экз. Заказ 502.

Цена свободная

Адрес редакции: 656049, Барнаул, пр-т Красноармейский, 90, каб. 210.

Издательство Алтайского государственного университета

Адрес учредителя и издателя: 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61

Типография Алтайского государственного университета:

656049, Барнаул, ул. Димитрова, 66