

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Ульяновский авиационно-промышленный комплекс –
50 лет развития»

(Россия, г. Ульяновск, 29 мая 2026 года)

Сборник трудов

Ульяновск
УлГТУ
2026

УДК 338.45:629.7(082)
ББК 39.5я43
В 85

В 85 **ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ** «Ульяновский
авиационно-промышленный комплекс – 50 лет развития» (Россия,
г. Ульяновск, 29 мая 2026 года) : сборник трудов [Электронный
ресурс]. – Электронные данные. Ульяновск : УлГТУ, 2026. – 295 с.

ISBN 978-5-9795-2595-2

Посвящается 50-летию Ульяновского авиационно-промышленного
комплекса.

Материалы представлены в авторской редакции.

УДК 338.45:629.7(082)
ББК 39.5я43

ISBN 978-5-9795-2595-2

© Коллектив авторов, 2026
© Оформление. УлГТУ, 2026

СЕКЦИЯ 1. ЦИФРОВИЗАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И РОБОТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВИАСТРОЕНИИ

УДК 629.05

АЛЕШИН Б.С., ЧЕРНОМОРСКИЙ А.И., ПЕТРУХИН В.А.,
ЛЕЛЬКОВ К.С., ХОРЕВ Т.С., АНТОНОВ Д.А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

РОБОТИЗИРОВАННАЯ КОЛЕСНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ ВНУТРИ ПРЕДПРИЯТИЯ

***Аннотация.** Изложены результаты разработки роботизированной колесной транспортной платформы (РКТП), оснащенной навигационно-управляющим комплексом (НУК), для перевозки грузов внутри предприятия. РКТП является элементом внутризаводского логистического коридора для перемещения грузов стандартизированного формата. Представлен технический облик РКТП. Основное внимание уделено функциональному обеспечению НУК при реализации автономной навигации, траекторного управления и взаимодействия РКТП с инфраструктурными объектами и участниками движения.*

***Ключевые слова:** роботизированная колесная транспортная платформа, навигационно-управляющий комплекс, система навигации и ориентации, система траекторного управления, система связи*

1. Введение

Современное состояние и перспективы развития интеллектуальных транспортно-логистических систем предприятия обуславливают возрастающую потребность внедрения беспилотных транспортных средств (БТС) в производственные циклы [1]. Актуальными являются задачи обеспечения автономности движения таких БТС, точности их навигации и траекторного управления, безопасности перемещений при наличии статических и динамических препятствий. В связи с этим особую значимость приобретает создание в качестве варианта БТС роботизированной колесной транспортной платформы (РКТП), обладающей всеми этими качествами. Целью настоящей работы является изложение результатов разработки РКТП, оснащенной навигационно-управляющим комплексом (НУК), для обеспечения внутризаводских перевозок грузов.

2. Технический облик РКТП

Разрабатываемая РКТП относится к классу автоматизированных мобильных роботов и представляет собой четырехколесное БТС с электрическим приводом и двухосевым рулевым управлением (рис.1). Конструктивной основой РКТП является сварная несущая рама. На ней установлены формирующие шасси два идентичных поворотных двухколесных модуля с приводом на оба колеса. Модули содержат приводные узлы с синхронными электродвигателями, элементы системы подвески и тормозной системы, блоки силовой и управляющей электроники, модули электромеханической рулевой системы, колеса со встроенными инкрементальными энкодерами. Технический облик РКТП составляют собственно шасси, опорная площадка для установки и крепления груза, блок светосигнального оборудования, блоки системы питания и НУК. Через пульт оператора осуществляется связь с РКТП для удаленного визуализированного управления платформой, передачи информации о состоянии бортовых систем платформы, обновления бортового программного обеспечения РКТП. Полная масса платформы составляет 650 кг при габаритах 2,6×1,5×1,5 м. Грузоподъемность платформы – 1 500 кг.

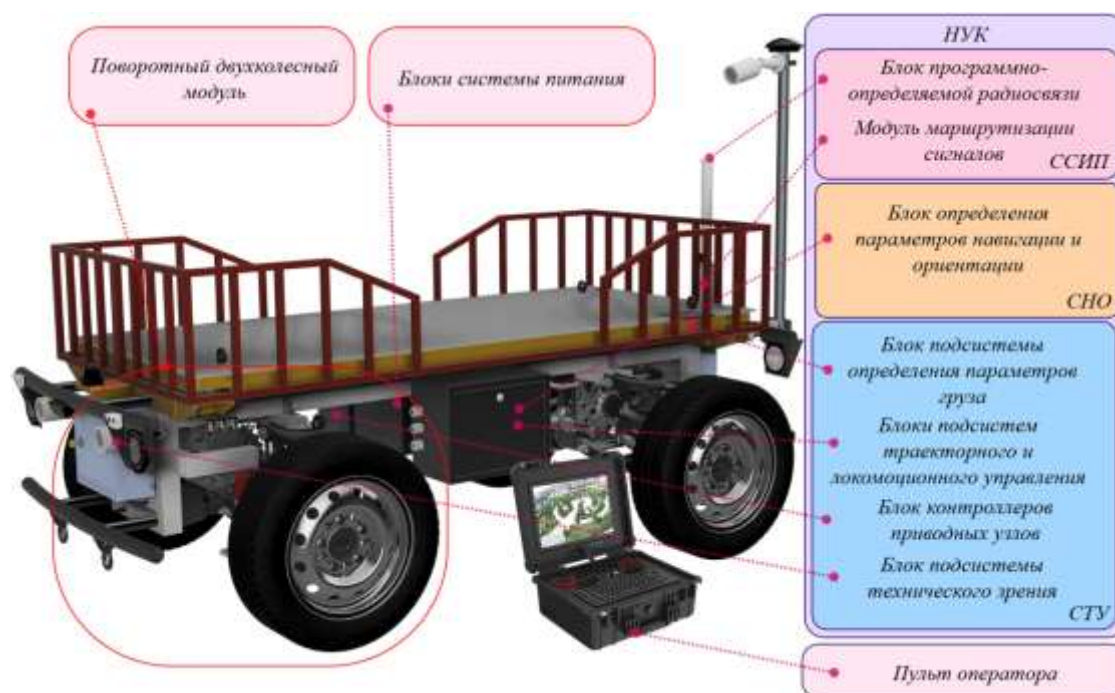


Рисунок 1 – Технический облик РКТП

3. Навигационно-управляющий комплекс

НУК обеспечивает автономную навигацию, траекторное управление и взаимодействие РКТП с инфраструктурными объектами и участниками

движения. Функционально НУК включает компоненты (рис.1): систему навигации и ориентации (СНО); систему траекторного управления (СТУ); систему связи с инфраструктурой предприятия (ССИП) V2X.

СНО предназначена для определения координат, скорости и азимутальной угловой ориентации РКТП. В состав ее блока определения параметров навигации и ориентации входят: спутниковый навигационный приемник с RTK-режимом; курсовой волоконно-оптический гироскоп; инкрементальные энкодеры; визуальный одометр; вычислитель. С целью обеспечения требований по точности решения задач навигации и управления движением, а также с целью обеспечения безопасности движения, в частности для исключения столкновений РКТП с другими участниками движения на предприятии, при наличии существенных искажения или при отсутствии сигналов от спутников СНС в навигационной системе в предлагаемом СНО дополнительно используется приемо-передатчик сверхширокополосной связи UWB. Комплексирование навигационной информации от всех источников осуществляется с использованием расширенного фильтра Калмана [2, 3]. Точность определения навигационных параметров и параметров ориентации по результатам моделирования и экспериментальной апробации составляет: координаты – 0,2 м; курсовой угол – 1° ; линейные и угловая скорости – 0,1 м/с и $0,01^\circ/\text{ч}$ соответственно.

ССИП включает блок программно-определяемой радиосвязи, модуль маршрутизации сигналов и предназначена для передачи телеметрической информации, дистанционного управления, обмена телематическими данными с транспортно-коммуникационной инфраструктурой предприятия, реализации технологий V2X, получения карты логистического коридора и ГИС-карты предприятия, получение маршрутного задания. Связь с оператором осуществляется посредством локальных беспроводных сетей и мобильных сетей передачи данных. Через ССИП реализуется удаленное управление РКТП на расстоянии до 1500 м.

СТУ обеспечивают движение РКТП по заданному маршруту с возможностью автоматического объезда препятствий. Функционально СТУ состоит из траекторной и локомоционной подсистем. В подсистеме траекторного управления осуществляется: выбор варианта (из возможных) рациональной глобальной траектории перемещения платформы с минимизацией рисков столкновения РКТП со статическими и динамическими препятствиями; определение программной скорости РКТП с минимизацией энергетических расходов и времени на реализацию движения; формирование управляющих линейной и угловой скоростей [4]. При этом оценка рисков столкновения РКТП с препятствиями осуществляется на основе информации о координатах и скоростях препятствий, поступающей через ССИП. Оценка энергетических расходов

производится на основе информации о погодных условиях и состоянии дорожного покрытия, передаваемой через ССИП, а также информации о габаритных и весовых характеристиках груза, поступающей от блока подсистемы определения параметров груза. Трансформация глобальной траектории на ее локальных участках с целью объезда препятствий осуществляется с применением алгоритма A^* [5] на основе информации от блока подсистемы технического зрения, содержащего сканирующий лазерный дальномер (лидар) и стереокамеру.

В подсистеме локомотионного управления формируются управляющие напряжения через блок контроллеров приводных узлов на двигатели колес и привода поворотных осевых модулей [6]. Для предотвращения столкновений используется прогнозирование траекторий движения платформы и окружающих объектов на временном горизонте до 15 секунд. В экстремальных ситуациях, в частности при ограниченной видимости (туман, ночное время суток), когда становится малоинформативным сигнал стереокамер, статичные или динамичные препятствия могут возникать на траектории движения РКТП в непосредственной близости от него. В этом случае при расстояниях между РКТП и препятствием порядка 2 м осуществляется блокирование выходов блок контроллеров по сигналам, поступающим с выхода ультразвуковых датчиков блока подсистемы технического зрения и, как следствие, останов РКТП.

СТУ обеспечивает: скорость движения – до 25 км/ч; отклонение от сформированной траектории – не более 0,25 м; объезд препятствий – на минимальном расстоянии от них порядка 0,5 м.

В качестве вычислительной платформы НУК используются высокопроизводительные бортовые вычислители на базе ARM-процессоров и специализированные модули ускорения обработки изображений и алгоритмов искусственного интеллекта.

Заключение

В работе представлена беспилотная робототехническая колесная транспортная платформа, предназначенная для автономного перемещения грузов в промышленной инфраструктуре. В МАИ (совместно с ООО «Статус Консалт») разработан РКТП, оснащенный навигационно-управляющим комплексом. На его опытном образце реализованы функции автономного движения, объезда препятствий, предотвращения столкновений и взаимодействия с цифровой инфраструктурой предприятия. Перспективы дальнейших исследований связаны с повышением уровня автономности, безопасности перемещений РКТП, расширением функциональности его систем.

Список литературы

1. Алешин Б. С., Черноморский А. И., Петрухин В. А., Лельков К. С. Навигация наземного колесного робота в инфраструктуре аэродрома // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. № 9. С. 293-302. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-9-293-294>.
2. Лельков К.С., Черноморский А.И. Комплексная навигационная система наземного колёсного робота// В сборнике: XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. Санкт-Петербург, 2022. С. 50-53.
3. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 196 с.
4. De Luca A., Oriolo G., Vendittelli M. Control of wheeled mobile robots: An experimental overview // Lecture Notes in Control and Information Sciences. London, 2001. Vol. 270. pp. 181-226
5. M. Likhachev, G. J. Gordon and S. Thrun, "ARA*: Anytime A* with Provable Bounds on Sub-Optimality," in Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 16, pp. 767-774, Dec. 2003, doi: 10.5555/2981345.2981441
6. Maksimov, V.N., Chernomorskii, A.I. "Control system of nonholonomic uniaxial wheeled module for monitoring geometry parameters of airfield pavements". J. Comput. Syst. Sci. Int. 54, 483–494 (2015). doi:10.1134/S1064230715030132.

УДК 533.6.011:519.246.8

ВАЛЬЦЕФЕР В. Э.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

АЕРОGP: РЕКОНСТРУКЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПО РАЗРЕЖЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ БПЛА С ПОМОЩЬЮ ГАУССОВСКИХ ПРОЦЕССОВ И ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

***Аннотация.** Статья посвящена разработке AeroGP – программного фреймворка, предназначенного для восстановления двумерных аэродинамических полей на основе разреженных и зашумлённых измерений, получаемых мобильным датчиком БПЛА. В основу фреймворка положены гауссовские процессы (GP) с анизотропным ядром, активный отбор проб, учитывающий физику задачи, а также топологический анализ реконструированного поля методом персистентной гомологии. Проведена валидация на двух аналитических потоках: потенциальном обтекании цилиндра и вихре Лэмба–Осина. Показано, что предложенная стратегия $UCB + \Psi$ даёт выигрыш по точности реконструкции относительно классического UCB , поскольку измерения перераспределяются в зоны с большим градиентом поля.*

***Ключевые слова:** гауссовские процессы, активный отбор проб, персистентная гомология, топологический анализ данных, реконструкция аэродинамических полей, БПЛА, вычислительная гидродинамика.*

Введение

Получение полной картины пространственного распределения аэродинамических параметров потока остаётся одной из ключевых задач аэродинамики. Традиционно для этого применяют численное моделирование (CFD), которое даёт поля с высоким разрешением, но ценой существенных вычислительных затрат. Экспериментальные подходы вроде PIV (велосиметрия по изображениям частиц) требуют стационарной установки и не всегда применимы в полевых условиях. В этом контексте особый интерес представляют беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащённые датчиками: они могут последовательно накапливать данные в разных точках пространства. Однако есть существенное ограничение – бюджет измерений невелик из-за энергетических и временных ограничений полёта.

Гауссовские процессы хорошо зарекомендовали себя как инструмент вероятностной интерполяции, дающий не только прогноз, но и оценку неопределённости [1]. UCB-стратегии, опирающиеся на верхнюю доверительную границу, позволяют направлять датчик туда, где неопределённость максимальна [2]. Параллельно в последние годы активно развивается топологический анализ данных (TDA): методы персистентной гомологии оказались полезны для выявления вихревых структур и классификации режимов течения [3]. Тем не менее, попыток объединить все три компонента в единый адаптивный конвейер, пригодный для работы в реальном времени, практически не предпринималось. Именно этот пробел и определяет направление настоящей работы.

Цель статьи – описать и проверить фреймворк AeroGP, который соединяет GP-регрессию, физически мотивированный активный отбор проб и TDA для реконструкции двумерных аэродинамических полей по разреженным данным. Мы проверяли гипотезу о том, что добавление градиентного члена $\nabla\mu$ в функцию приобретения позволяет снизить ошибку реконструкции за счёт перераспределения измерений в зоны, где поле меняется резче всего.

Методы

Пусть задано двумерное скалярное поле $f(x)$, $x \in \Omega \subset \mathbb{R}^2$, описывающее некоторую аэродинамическую характеристику – например, модуль скорости или давление. Доступ к полю осуществляется через точечный датчик, поэтому каждое измерение имеет вид $y_i = f(x_i) + \varepsilon_i$, где $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$. Точки измерения выбираются одна за другой адаптивно; всего допускается не более $N = 200$ измерений.

Суррогатная модель поля строилась на основе GP с анизотропным RBF-ядром. Выбор анизотропного ядра продиктован физикой: аэродинамические поля, как правило, вытянуты вдоль направления

набегающего потока, поэтому масштабы длины по осям X и Y задаются независимо и подбираются в ходе обучения. Чтобы не накапливать слишком много обучающих точек, мы использовали буфер размером 500 точек, работающий по принципу скользящего окна.

Центральным элементом подхода стала модифицированная функция приобретения. Она состоит из трёх слагаемых: среднее GP $\mu(x)$, взвешенная неопределённость $\kappa_{\text{eff}} \cdot \sigma(x)$ и, собственно, градиентный член $\lambda \cdot \|\nabla \mu(x)\|$. Последний как раз и отвечает за то, чтобы датчик не обходил стороной зоны быстрого изменения поля – сдвиговые слои, границы вихрей, области ускорения. Именно такие места чаще всего дают наибольший вклад в ошибку. Кроме того, для зашумлённых данных мы ввели адаптивное демпфирование разведочного коэффициента: $\kappa_{\text{eff}} = \kappa \cdot \max(0.25, 1 - 4 \cdot \sigma_{\text{noise}})$. Это не даёт тратить бюджет на разведку, когда шум и так слишком велик.

Перед подачей в GP измерения проходят через адаптивный фильтр Калмана. Шум оценивается по трём каналам с помощью экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EMA) – это даёт более робастную оценку, чем одноканальная схема. Для извлечения структурной информации из GP-суррогата мы применили персистентную гомологию через кубический комплекс библиотеки GUDHI [6]. H_0 -компоненты здесь соответствуют связным областям повышенной завихрённости, а H_1 – замкнутым вихрям. Чтобы TDA не становился узким местом при бортовом использовании, реализован инкрементальный режим с кэшированием.

Экспериментальная установка

Фреймворк проверялся на двух аналитических тестовых потоках. Первый – потенциальное обтекание кругового цилиндра. Это безвихревое течение, но с заметными зонами ускорения по бокам цилиндра и торможения в критических точках – по сути, классический учебный пример [8]. Второй – вязкий вихрь Лэмба–Осина, у которого гауссов профиль завихрённости создаёт нетривиальную топологическую структуру, интересную для тестирования TDA-модуля.

Для каждого потока выполнялись серии запусков при бюджете $N = 200$. Шум задавался на уровне $\sigma = 0.04$ (обтекание) и $\sigma = 0.03$ (вихрь). Мы сравнивали две конфигурации: стандартный UCB (при $\lambda = 0$, то есть без градиентного члена) и предлагаемый UCB+ $\nabla \mu$ ($\lambda > 0$). Качество оценивалось по относительной ошибке L2, ошибке завихрённости и F1-мере обнаружения вихрей.

Обсуждение

Полученные результаты, на наш взгляд, подтверждают исходную гипотезу. Стратегия UCB+ $\nabla \mu$ действительно перераспределяет бюджет в

пользу зон с резким изменением поля – именно эти зоны оказываются узким местом при реконструкции. TDA тоже справился с обеими задачами: в безвихревом потоке нет ложных H1-срабатываний, а у вихря чётко детектируется нетривиальная H1-компонента.

Следует оговориться об ограничениях. Валидация проведена исключительно на аналитических потоках с гладкими решениями – как себя поведёт система на турбулентных течениях, пока неясно. Кроме того, мы рассматривали только двумерные стационарные поля. Перспективными направлениями мы считаем интеграцию с реальными PIV-данными, расширение на нестационарные течения (для чего потребуется временное ядро GP), внедрение физических ограничений через PINN [7], а также переход к SVGP [9] при увеличении бюджета измерений.

Заключение

В работе представлен AeroGP – фреймворк для восстановления двумерных аэродинамических полей. Он соединяет GP-регрессию с анизотропным ядром, физически мотивированный активный отбор проб (UCB+ $\nabla\mu$) и персистентную гомологию. Эксперименты показали, что градиентная модификация снижает ошибку, а TDA-модуль верно идентифицирует топологию обоих потоков. За счёт кэширования TDA один цикл «измерение – результат» укладывается в 10–50 мс – этого хватает для бортового применения при частоте зондирования 1–10 Гц. В дальнейшем фреймворк может лечь в основу системы адаптивной аэродинамической разведки с помощью БПЛА

Список литературы

1. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press, 2006. 248 p.
2. Srinivas N., Krause A., Kakade S., Seeger M. Gaussian process optimization in the bandit setting: no regret and experimental design // IEEE Transactions on Information Theory. 2012. Vol. 58, No. 5. P. 3250–3265.
3. Edelsbrunner H., Harer J. Computational Topology: An Introduction. American Mathematical Society, 2010. 241 p.
4. Krasnopolsky V.M. Neural network based surrogate models for CFD // Neural Networks. 2013. Vol. 38. P. 32–41.
5. Brunton S.L., Noack B.R., Koumoutsakos P. Machine learning for fluid mechanics // Annual Review of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 52. P. 477–508.
6. Maria C., Boissonnat J.-D., Glisse M., Yvinec M. The GUDHI library: simplicial complexes and persistent homology // Mathematical Software – ICMS 2014. Springer, 2014. P. 167–174.
7. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
8. Lamb H. Hydrodynamics. 6th ed. Cambridge University Press, 1932. 738 p.
9. Hensman J., Fusi N., Lawrence N.D. Gaussian processes for big data // Proceedings of UAI. 2013. P. 282–290.
10. Kennedy M.C., O’Hagan A. Predicting the output of a complex computer code when fast approximations are available // Biometrika. 2000. Vol. 87, No. 1. P. 1–13.

УДК 629.7.018

ВОРОБЬЕВ А.Р.

Южно-уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППОЙ

***Аннотация.** В данной работе решается проблема уровня вибраций, генерируемых винтомоторными установками летательных аппаратов. В ходе работы была составлена методика эксперимента по определению частотных характеристик двигательной установки БПЛА, проведены экспериментальные исследования характеристик. С использованием метода быстрого преобразования Фурье были проанализированы выходные параметры чувствительных элементов силоизмерительного устройства и сделаны выводы по выявленным резонансным частотам системы.*

***Ключевые слова:** Вибрации, винтомоторные установки, эксперимент, преобразование Фурье, резонанс.*

Вследствие сложности и высокой стоимости объектов ракетно-космической техники (РКТ) и летательных аппаратов (ЛА) их экспериментальной отработке уделяется исключительное внимание [1]. Для измерения характеристик ДУ имеются различные методы, которые зависят от их исполнения и заявленных параметров. Стендовые испытания летательных аппаратов необходимы на различных этапах жизненного цикла как отдельных элементов, так и изделий в целом. На этапе экспериментального исследования средства измерения играют ключевую роль при создании теоретической и методической базы, позволяющей обеспечить требуемые показатели качества по надежности разрабатываемых ЛА. [2, 3]

Современная методика стендовых испытаний двигательных установок при значительном уровне технологического прогресса в области проектирования и экспериментальной отработки, не позволяют с достаточной точностью оценить изменения векторов тяги и моментов на стадии наземной отработки технических решений. Таким образом, в ходе данного исследования решались задачи оценки пропускной способности чувствительных элементов силоизмерительного устройства при наземной отработке ДУ БПЛА. Для решения этой задачи предлагается провести численное моделирование вибрационного нагружения штанг силоизмерительного устройства.

Для генерации подъемной силы, необходимой для взлёта демонстратора БПЛА и его дальнейшего полета была выбрана высокочастотная электрическая трехфазная синхронная бесщёточная машина с постоянными магнитами, обладающая следующими характеристиками:

- номинальная частота вращения: 7 000 об/мин;
- номинальная мощность: 3,06 кВт;
- действующее значение номинального тока: 76,9 А;
- масса активной части: 0,98 кг.

Основные эксплуатационные параметры винтовентилятора, разработанного на базе указанных электродвигателя, необходимые для разработки взлетно-маршевой винтомоторной установки, перечислены ниже:

- номинальная частота вращения: 7 000 об/мин;
- тяга: 16,1 кг;
- масса: 1,44 кг.

Экспериментальное исследование

На данном этапе исследования проверялась возможность использования тензодатчиков для определения собственных частот силоизмерительного устройства с установленной на нём винтомоторной группой БПЛА изменяемого вектора тяги. С помощью разрабатываемой методики становится возможным не только определение резонансных частот объектов исследований, но и определение величины динамического дисбаланса винтомоторных групп на стадии наземной отработки. На этапе экспериментальных исследований летательных аппаратов ключевым элементом является двигательная установка (ДУ). Для определения частотных характеристик ОИ используемые в конструкции силоизмерительного устройства тензометрические датчики были перепрограммированы под воспроизведение вибрационных нагрузок по принципу, близкому к акселерометру.

Рабочие режимы винтомоторной группы:

- Ступенчатое изменение тока до выхода ОИ на 50% максимальной тяги;
- Поворот органов управления влево на величину 10...25° с шагом в 5° и удержанием каждого рабочего режима в течение 5 секунд;
- Поворот органов управления вправо на величину 10...25° с шагом в 5° и удержанием каждого рабочего режима в течение 5 секунд;
- Повтор пп.2 – 3 при выходе ОИ на 100% максимальной тяги;
- Выключение.

На Рис. 1 представлена зависимость изменения частоты вращения от времени испытания. Частота вращения регистрировалась датчиком Холла, в то время как дальнейшая обработка записей с тензодатчиков проводилась по методике, описанной в [4, 5].

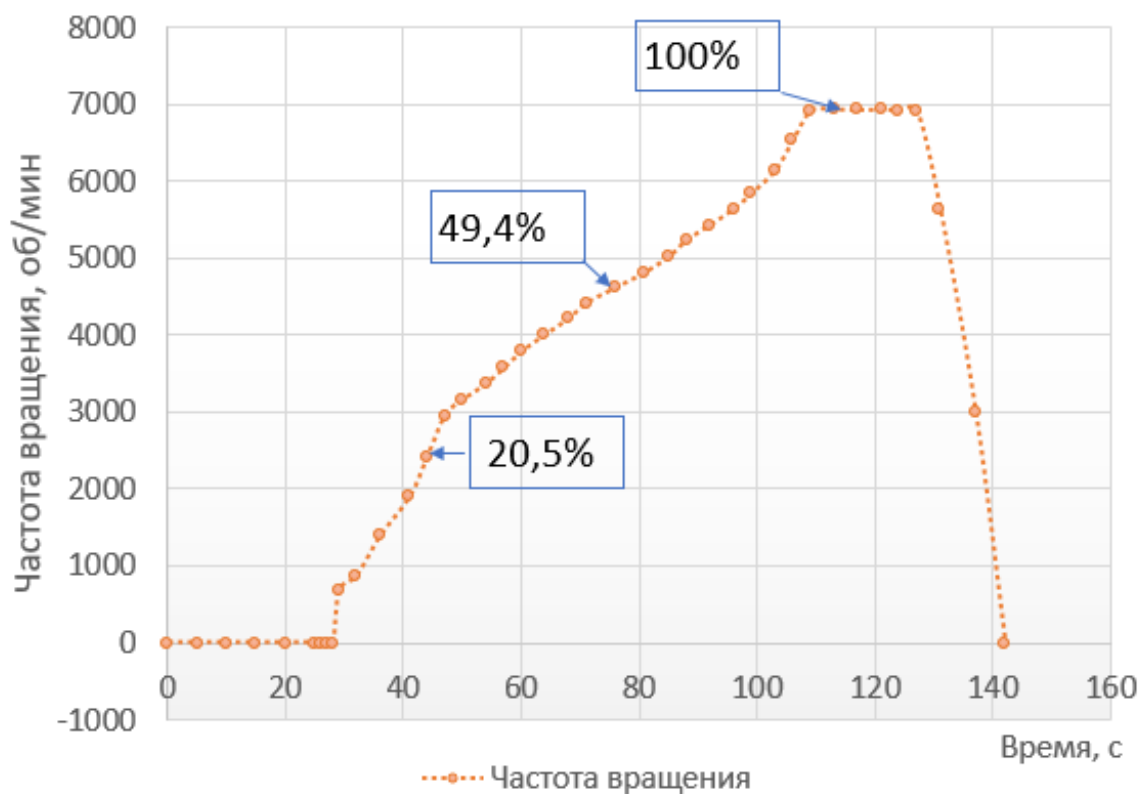


Рисунок 1 – Изменение частоты вращения винтомоторной группы БПЛА от времени

Таблица 1. Изменение частоты вращения ДУ БПЛА от времени испытания

Время, с	Частота вращения, об/мин	Частота вращения, Гц	Время, с	Частота вращения, об/мин	Частота вращения, Гц
44	2424	40,40	88	5234	87,23
47	2955	49,25	92	5433	90,55
50	3156	52,60	96	5641	94,02
54	3367	56,12	99	5843	97,38
57	3571	59,52	103	6141	102,35
60	3785	63,08	106	6534	108,90
64	4006	66,77	109	6914	115,23
68	4214	70,23	113	6931	115,52
71	4417	73,62	117	6927	115,45
76	4616	76,93	121	6930	115,50
81	4818	80,30	124	6924	115,40
85	5022	83,70	127	6925	115,42

В ходе испытаний был получен массив значений с тензодатчиков силоизмерительного устройства. Далее он был проанализирован и представлен в виде спектральной плотности.

Таблица 2. Резонансные частоты вращения ДУ БПЛА с проекциями вектора тяги

Время, с	Частота вращения, об/мин	Частота вращения, Гц	P_x , кг	P_y , кг	P_z , кг
44	2424	40,4	0,014	0,013	3,11
76	4616	76,93	0,042	0,041	7,49
113	6914	115,23	0,101	0,109	15,16

Для анализа полученных экспериментальных данных предлагается использовать метод быстрого преобразования Фурье, которое было реализовано с использованием программного пакета MATLAB 2019b. [5]. Из массива данных извлекался участок с установившимся режимом работы винтомоторной группы. Далее данный фрагмент установившегося режима работы двигательной установки преобразовывался в амплитудный спектр методом быстрого преобразования Фурье. Результаты преобразования показаны на Рис. 2–12. Полученные, в ходе эксперимента по определению динамических характеристик, графики амплитудного спектра демонстрируют скачки амплитуды на низких частотах с затуханием. Однако, на частотах 1238 и 1253 Гц тензодатчиков ТД1 и ТД5 наблюдается рост амплитуды колебаний.

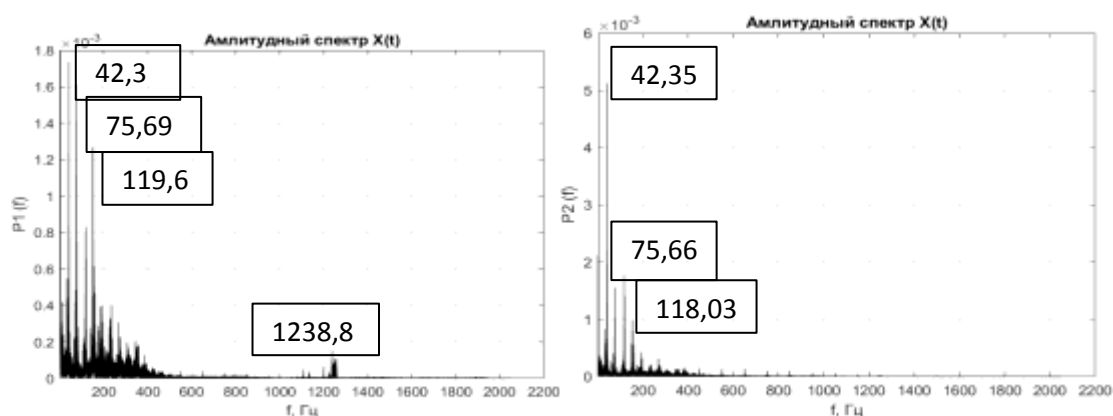


Рисунок 2 – Амплитудный спектр 1-го и 2-го тензодатчиков

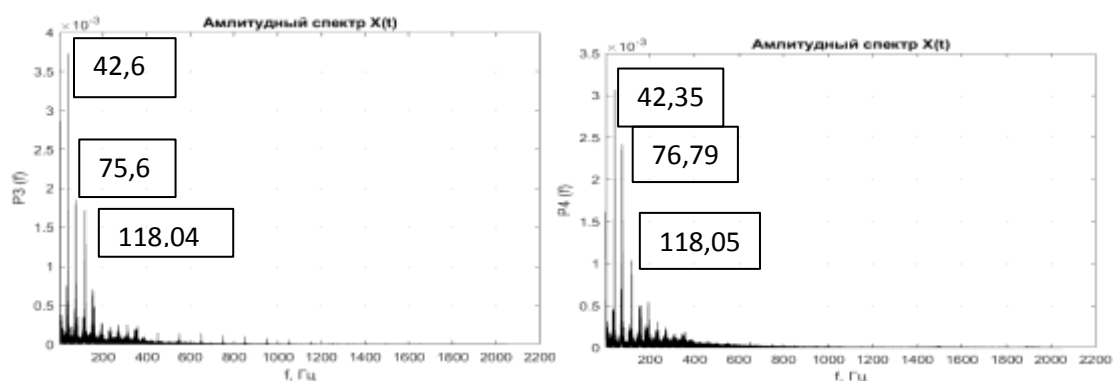


Рисунок 3 – Амплитудный спектр 3-го и 4-го тензодатчиков

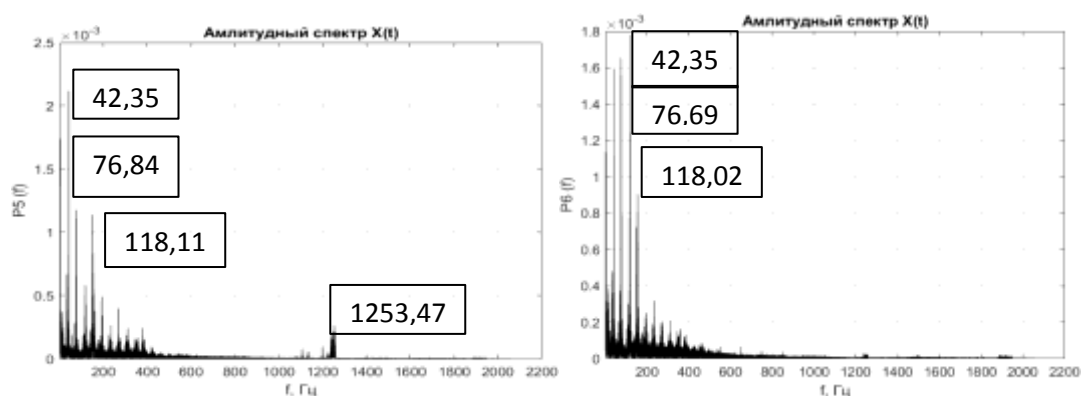


Рисунок 4 – Амплитудный спектр 5-го и 6-го тензодатчиков

Полученные, в ходе эксперимента по определению динамических характеристик, графики амплитудного спектра демонстрируют скачки амплитуды на низких частотах с затуханием. В таблице 3 представлено сравнение собственных частот тензодатчиков, полученных в ходе проведения модального анализа штанг силоизмерительного устройства с характерным пиком амплитуд на близких частотах.

Таблица 3. Сравнение экспериментальных показаний частот тензодатчиков с теоретическими

№ Моды	$f_{теор}$, Гц	$f_{эксп}$, Гц	δ , %
1	104,96	119,68	12,3
2	104,69	118,03	11,3
3	105,05	118,04	10,6
4	104,61	118,05	11,3
5	104,66	118,11	11,4
6	104,84	118,03	11,1

Список литературы

1. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники / А.Г. Галеев, Ю.В. Захаров, В.П. Макаров, В.В. Родченко. – М.: Издательство МАИ, 2014. – 283 с.
2. Галеев А.Г. Проектирование стендов и оборудования для испытаний двигательных установок летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ. Учебное пособие, 1987.
3. Галеев А.Г. Эксплуатация стендов для испытаний ракетных двигательных установок. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. Учебное пособие, 2008.
4. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний: Пер. с англ. Изд. 2, доп. 1972. 368 с.
5. MATLAB 2019 Fast Fourier transform

УДК 004.896

У Г., СЕРЕБРЕННЫЙ В. В.

Московский государственный технический университет им. Баумана,
г. Москва, Россия

ВОПРОСЫ РОБОТИЗАЦИИ ОПЕРАЦИЙ СВЕРЛОВКИ И КЛЕПКИ ФЮЗЕЛЯЖЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

***Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы роботизации операций сверловки и клепки фюзеляжей грузовых самолетов, вертолетов и региональных пассажирских самолетов. Выделены ограничения полной автоматизации и обоснована необходимость участия человека в производственном процессе. Предложена структура системы управления коллаборативной многоагентной робототехнической системой.*

***Ключевые слова:** сверловки и клепки, роботизация, многоагентная система, коллаборативная система.*

Роботизация технологического процесса сверловки и клепки

Большое количество отверстий на поверхности фюзеляжа летательного аппарата (ЛА) определяет необходимость автоматизации операций сверловки и клепки. Для крупных магистральных пассажирских ЛА технологии автоматизации данных операций уже внедрены в производство. Применяются многоагентные робототехнические системы (РТС), в которых каждый робот оснащается либо интегрированным конечным эффектором, либо револьверной головкой со всеми необходимыми инструментами для выполнения сверловки, удаления заусенцев, зенковки, нанесения герметика, установки заклепок и клепки. Как показано на Рис. 1, в производственной ячейке компании Boeing роботы закреплены на мобильных платформах, а роботы компании Airbus подвешены сверху и перемещаются вдоль направляющих портальной конструкции.



Рисунок 1 – Применяемые многоагентные РТС в реальном производстве.
а) Boeing; б) Airbus

В отличие от крупносерийного производства крупных пассажирских ЛА, номенклатура грузовых самолетов, вертолетов и региональных пассажирских самолетов значительно шире, а объем выпуска каждой модели невелик. При смене типа изделия РТС приходится переналаживать технологический процесс. Такая переналадка требует значительных временных и финансовых затрат. По этой причине роботизированные технологии сверловки и клепки при сборке фюзеляжей грузовых самолетов, вертолетов и региональных пассажирских самолетов пока не получили широкого промышленного распространения. В настоящее время операции сверловки и клепки фюзеляжей указанных типов ЛА по-прежнему в основном опираются на ручной труд.

С технической точки зрения роботизация операций сверловки и клепки в производстве указанных типов ЛА вполне осуществима. Обшивка их фюзеляжа обычно имеет небольшую толщину. Поэтому в разных странах всё шире применяются вытяжные заклепки (Рис. 2, а). В отличие от традиционных двусторонних заклёпок (Рис. 2, б), вытяжные заклепки устанавливаются только с наружной стороны фюзеляжа. Наковальня с внутренней стороны в этом случае не требуется. Не требуется и синхронная работа роботов с двух сторон. Для двух типов заклёпок используются разные клепальные инструменты. Вместе с тем интегрированные конечные эффекторы в обоих случаях близки по конструкции к решениям, применяемым в автоматизированных системах для крупных пассажирских ЛА.



Рисунок 2 – Два типа заклепок. а) Вытяжные; б) Двусторонние

Тем не менее внедрение роботизированных операций сверловки и клепки при сборке указанных типов ЛА связано с рядом задач. Прежде всего требуется определить оптимальное распределение последовательности обработки. В качестве основного критерия при этом принимается суммарное время выполнения работ, то есть общая производительность, поскольку каждый робот может выполнять любую операцию технологического цикла. Кроме того, в системе необходимо предусмотреть резервирование на случай отказа одного из роботов и последующее перепланирование последовательности операций. Наконец, требуется обеспечить достаточную гибкость процесса, необходимую при изменении спецификации изделия. По существу, речь идёт о задаче динамического распределения задач в многоагентной системе.

Необходимость участия оператора в роботизированном производстве

Даже при принципиальной возможности роботизации говорить на данном этапе о полной автоматизации не приходится. Во-первых, остается нерешенной задача стабильного обеспечения точности обработки отверстий на уровне менее 0,2 мм. При выполнении операций сверловки и клепки ось инструмента или заклепки должна быть максимально близка к нормали к касательной плоскости в точке отверстия. У рассматриваемых типов ЛА конструкция более компактна, поэтому отдельные участки поверхности нередко имеют большую кривизну или сложную геометрию. В таких условиях существенно усложняется позиционирование и ориентация конечного эффектора робота.

Во-вторых, не все отверстия доступны для роботизированной обработки. На поверхности фюзеляжа неизбежно присутствуют труднодоступные зоны, в том числе верхние и нижние участки, области вблизи силовых элементов и места, частично закрытые конструкцией. В одних случаях оказывается недостаточным рабочее пространство, в других требуется сложное планирование траектории. И то и другое приводит к заметному увеличению временных затрат.

В-третьих, соединительные узлы, переходные зоны и другие ответственные участки рассматриваемых типов ЛА воспринимают наибольшие нагрузки. Качество сборки и надежность в этих местах имеют

особенно большое значение. Цена ошибки здесь существенно выше, чем на обычных участках. По этой причине передача всех операций многоагентной РТС на таких участках в настоящее время представляется нереалистичной. Следовательно, участие оператора в процессе роботизации сверловки и клепки приобретает принципиальное значение.

Следует отметить, что даже в автоматизированном производстве крупных пассажирских ЛА сохраняется необходимость в присутствии оператора, осуществляющего контроль на месте и реагирующего на такие ситуации, как низкое качество клепки или повреждение обшивки. Конструкция рассматриваемых типов ЛА сложнее с точки зрения автоматизации, поэтому роль оператора на верхнем уровне управления становится еще более важной. На него возлагаются не только функции наблюдения за работой системы, но и участие в перепроектировании процесса при необходимости. Необходимо сохранять механизм ручного управления, повышающий безопасность системы и обеспечивающий быстрое реагирование в аварийных ситуациях.

При включении оператора в производственный процесс возникает необходимость в разработке интеллектуального интерфейса взаимодействия. В настоящее время в цифровом производстве уже применяются различные средства передачи производственной информации. К ним относятся, например, проецирование инструкций на поверхность обшивки и использование очков дополненной реальности для выдачи указаний оператору.

При совместной работе людей и многоагентной РТС первостепенное значение приобретает обеспечение безопасности. В связи с этим требуется система мониторинга, способная отслеживать положение человека и работа в рабочем пространстве. С позиций эргономики в ходе промышленного процесса необходимо также контролировать физиологическую и психическую нагрузку оператора и с учетом этого корректировать распределение выполняемых им задач.

Структура системы управления коллаборативной многоагентной РТС

Итак, роботизация операций сверловки и клепки при сборке рассматриваемых типов ЛА по своей сути сводится к созданию системы совместного производства, в которой коллаборативность реализуется на двух уровнях: на исполнительном уровне – при совместном выполнении операций оператором и многоагентной РТС, и на верхнем уровне – при участии оператора в контроле, перераспределении заданий и принятии решений. Исходя из данной концепции, предложена структура системы управления. (Рис. 3).

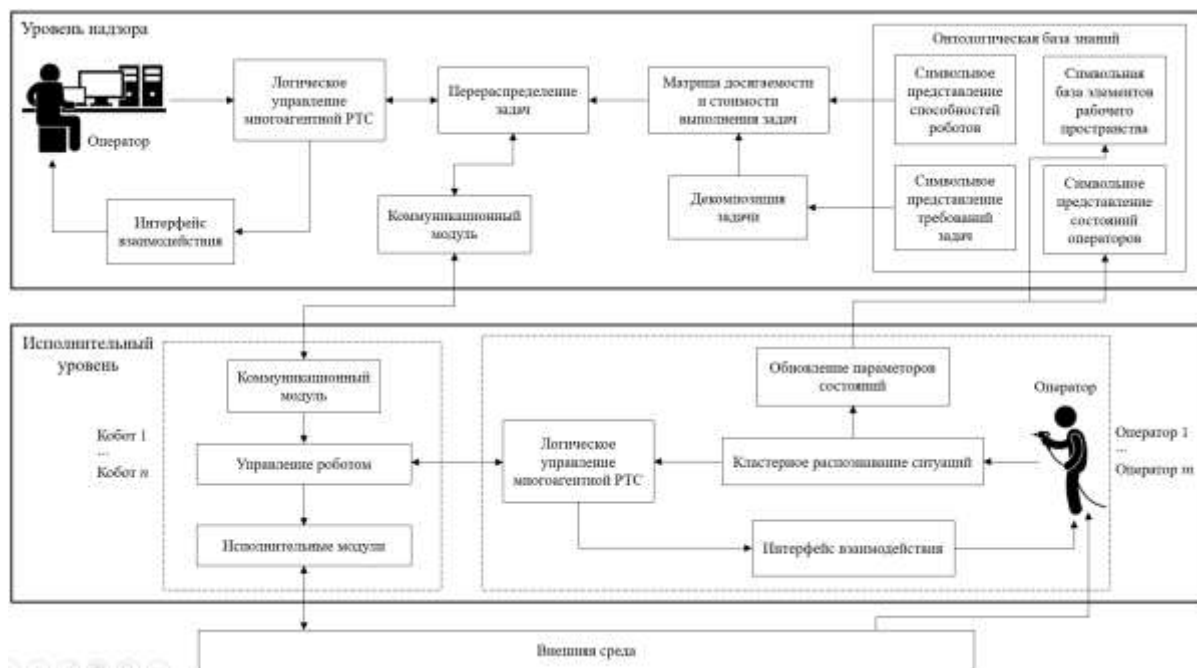


Рисунок 3 – Структура системы управления многоагентной РТС

Для данной системы управления необходимо сформировать базу знаний на основе онтологии [1]. В ней должны фиксироваться ход выполнения задач и текущее состояние агентов. На этой основе формируется единая сеть семантических связей. Посредством запросов и семантического вывода из базы знаний извлекается информация, необходимая для поддержки перераспределения задач.

Для многоагентных систем разработан целый ряд методов распределения заданий, включая алгоритмы аукциона и оптимизационные эвристические подходы. Для рассматриваемой задачи обоснованным представляется применение метода смешанно-целочисленного линейного программирования с критерием минимизации общего времени выполнения работ. Такой выбор связан с наличием большого числа ограничений, сопровождающих операции сверловки и клепки. К их числу относятся ограничения по достигаемости, отношения предшествования между операциями, а также конфликты безопасных зон.

В тех случаях, когда результаты офлайн-распределения перестают соответствовать фактическому ходу выполнения работ либо в процессе производства возникают нештатные ситуации, приводящие к снижению эффективности, возникает необходимость в повторном распределении заданий. С учетом изменения возможностей человека можно моделировать процессы утомления и восстановления оператора [2]. Наряду с этим возможен и другой подход, основанный на текущем контроле состояния оператора и последующем динамическом онлайн-перераспределении задач.

Система мониторинга реализует кластерное распознавание ситуаций и включает несколько функциональных модулей. Так, архитектура OpenPose используется для определения положений ключевых точек тела человека. Предусматривается также мультимодальное взаимодействие человека с РТС. Речь идет о взаимо-понимании человека и технической системы [3], включая распознавание жестов и речевых команд оператора, а также разработка подсветки рабочих зон и генератора речи для передачи информации оператору.

В промышленной практике для оценки физиологической нагрузки широко применяются показатели REBA, RULA и другие. Психологическая нагрузка может оцениваться по совокупности нескольких признаков, среди которых частота моргания, длительность зрительного сосредоточения, число переводов взгляда в сторону робота, время реакции на команды, а также расстояние до робота [4].

Заключение

В настоящее время не существует методики проектирования коллаборативных ячеек для операций сверловки и клепки фюзеляжей грузовых самолетов, вертолетов и региональных пассажирских самолетов. Установлена необходимость роботизации данных операций и участия человека в производственном процессе. Предложена структура системы управления и определены ее основные элементы: перераспределение задач, база знаний и система мониторинга.

Список литературы

1. Wu G, Shereuzhev MA, Serebrenny VV. Ontology-Based Knowledge Representation and Task Implementation in Collaborative Robotic Cells for Drilling and Riveting on Aircraft Fuselages. In 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) 2024 Sep 8 (pp. 715-720). IEEE.
2. Yao B., Li X., Ji Z., Xiao K. and Xu W., 2024. Task reallocation of human-robot collaborative production workshop based on a dynamic human fatigue model. Computers & Industrial Engineering, 189, p.109855.
3. Ющенко АС. ЧЕЛОВЕК И РОБОТ-ОТ УПРАВЛЕНИЯ К ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ. XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023) 2023 (pp. 19-22).
4. Lagomarsino M, Lorenzini M, Balatti P, De Momi E, Ajoudani A. Pick the right co-worker: Online assessment of cognitive ergonomics in human-robot collaborative assembly. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems. 2022 Jun 14;15(4):1928-37.

УДК 629.7.013

КУТЕПОВ А.П., КОШКИНА А.А., ГОРЮНОВ С.В.

Акционерное общество «Авиационный комплекс имени С.В. Ильюшина»,
г. Москва, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА МАССЫ ЛИНИЙ ВЗАИМОСВЯЗИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО СУДНА

***Аннотация.** В статье представлен подход к автоматизированной оценке массы линий взаимосвязи бортовых систем, реализованный в виде специализированного приложения, основанный на поиске кратчайших путей алгоритмом Дейкстры. Разработанное приложение позволяет по таблице соединений и геометрии магистралей вычислить массу линий взаимосвязи.*

***Ключевые слова.** Бортовая кабельная сеть, расчёт массы, погонная масса провода, связанный граф, алгоритм Дейкстры, CAD-система T-FLEX,*

Масса бортовой кабельной сети является одной из значимых составляющих взлётной массы современного воздушного судна, поэтому её прогноз является на ранних стадиях проектирования критически важен. Именно на этом этапе закладывается архитектура связей, взаимное расположение блоков и конфигурация магистралей – решения, от которых зависит итоговая масса проводов. Традиционные подходы дают точную оценку только после завершения детальной трассировки, когда вносить существенные изменения в компоновку уже затратно. Поэтому разработка алгоритма, позволяющего оперативно оценивать массу линий взаимосвязи до выполнения полной проработки, помогая конструктору принимать обоснованные решения, влияющие на весовую эффективность самолёта. Оформление данного подхода в форме специализированного приложения позволяет сделать процедуру оценки массы линии взаимосвязи практичной и доступной в рабочем цикле проектирования.

Программное средство реализовано в виде приложения с графическим интерфейсом (рис.1), объединяющим три функциональные зоны:

- 1 – панель импорта исходных данных;
- 2 – область трёхмерной визуализации;
- 3 – блок вывода результатов.

Такая архитектура обеспечивает последовательное выполнение этапов загрузки, визуального контроля геометрии и получения численной оценки массы без переключения между отдельными программными модулями.

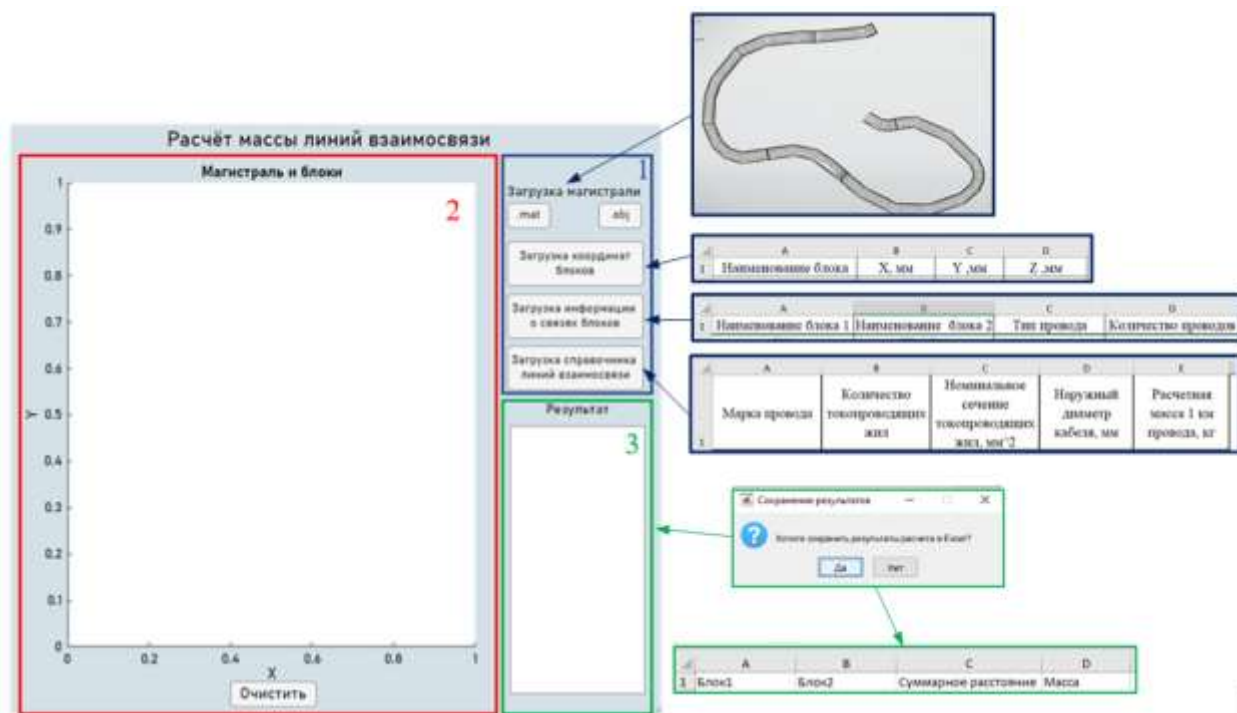


Рисунок 1 – Интерфейс приложения для расчёта массы линий взаимосвязи

Исходными данными для работы алгоритма служат четыре информационных компонента.

Первый компонент – геометрическая модель магистралей, импортируемая из CAD-системы T-Flex. Модель представляет собой совокупность трёхмерных трубок, внутри которых допускается прокладка проводов. Модель импортируется в приложение в формате «.obj». В процессе импорта из файла извлекаются координаты характерных точек магистрали и топологические связи между ними. Приложение так же даёт пользователю загружать геометрическую модель магистрали в формате «.mat», если модель магистрали уже использовалась ранее и была преобразована в приложении [1]. Это позволяет ускорить работу приложения, т.к. не нужно повторно обрабатывать геометрию магистрали. Загруженная геометрия отображается в области визуализации, что позволяет пользователю проконтролировать целостность и правильность исходных данных геометрической модели магистрали.

Второй компонент – координаты блоков. Эти данные могут быть так же считаны из CAD-системы T-Flex, либо из отдельного структурированного файла Excel. Каждому блоку присваивается уникальное наименование, используемое в дальнейшем для установления соответствия с записями таблицы соединений. Точки, соответствующие центрам блоков, так же отображаются в области визуализации.

Третий компонент – таблица межблочных соединений, загружаемая в виде электронной таблицы. Для каждой линии взаимосвязи в ней заданы:

наименование источника (блок 1), наименование приёмника (блок 2), тип провода и количество проводов. При импорте осуществляется формальная верификация: наименования источника и приёмника должны присутствовать в перечне блоков, загруженных на предыдущем шаге. Обнаруженные несоответствия регистрируются и предъявляются пользователю для коррекции.

Четвёртый компонент – справочник типов проводов. Справочник хранится в виде редактируемой таблицы и содержит для каждого типа провода значение погонной массы. На этапе загрузки соединений осуществляется проверка наличия в справочнике каждого указанного в ней типа провода, отсутствующие типы проводов фиксируются как ошибка.

Таким образом, после завершения импорта исходных данных приложение формирует единую внутреннюю модель и отображает её в области визуализации. Далее выполняется основная вычислительная процедура. Она состоит из двух последовательных этапов: построения магистрали и поиска кратчайших путей между блоками с последующим пересчётом длин в массу.

Магистраль представляется в виде неориентированного взвешенного графа, где вершинами являются точки магистрали, а рёбра соединяют эти точки с весами, равными расстоянию между ними [2]. Центр каждого блока проецируется на ближайшую точку, лежащую на одном из сегментов магистрали. Эта точка добавляется в граф как новая вершина и соединяется с узлом, соответствующим центру блока [3]. Таким образом, каждый блок оказывается связанным с графом через единственный узел привязки.

Для поиска кратчайшего пути между проекциями применяется алгоритм Дейкстры [4]. В первую очередь создается очередь узлов, где хранятся текущие минимальные расстояния от начальной точки. На каждом шаге алгоритм идет по узлам: выбирает узел, который ещё не был посещён, с минимальной известной на данный момент оценкой расстояния от источника, после чего обновляет оценки расстояний до его соседей, если найденный через него путь оказывается короче текущего известного. Алгоритм останавливается, когда кратчайший путь до целевой точки найден.

Из справочника проводов для каждого типа линии, указанного в таблице соединений, извлекается значение погонной массы. С учетом количества проводов в данной связи и полученного значения длины между блоками, вычисляется масса линий взаимосвязи двух устройств. Процедура повторяется для всех строк таблицы соединений. Итоговая оценка массы совокупности линий взаимосвязи получается суммированием масс всех рассчитанных маршрутов.

Разработанный подход позволяет оперативно оценивать массу линий взаимосвязи при любых изменениях на начальных этапах проектирования

системы. Приложение даёт инженеру-конструктору возможность прорабатывать различные варианты расположения и взаимодействия устройств, и выбирать лучший с точки зрения массы вариант.

Список литературы

1. Черных А.П. MATLAB для инженеров и научных работников. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 512 с.
2. Буров В.А. Основы теории графов. – М.: Физматлит, 2006 – 256 с.
3. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.
4. Дейкстра Э.В. Заметка о двух задачах в теории графов // Математика. – 1959. – Т.1. – С. 269 – 271.

УДК 629.7.05

ГОРЮНОВА Е.С.

МАИ, Московский авиационный институт, г. Москва

АО «Ил», Акционерное общество «Авиационный Комплекс им. С.В.

Ильюшина», г. Москва

МОБИЛЬНЫЙ СТЕНД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ СИСТЕМ САМОЛЕТА

***Аннотация:** В статье рассматривается концепция мобильного автоматизированного стенда для проверки электроагрегатов бортовых систем самолетов. Обосновывается применение принципов модельно ориентированного проектирования для снижения временных и трудовых затрат. Предложены архитектура и функционал системы, включающие прозвонку цепей, прототипирование блоков, имитацию окружения блоков, автоматизированный контроль бортовых систем.*

***Ключевые слова:** модельно ориентированное проектирование, стенд проверки, автоматизация, прототипирование, машина реального времени.*

Коммутирующая коробка – коробка, предназначенная для подключения устройств друг к другу.

Объект исследования – объект, на который направлена проверка системой.

Система – совокупность взаимосвязанных компонентов, которые работают совместно для достижения общей цели.

Стенд – оборудованное место для испытания.

Одной из технологий модельно ориентированного проектирования является применение компьютерных моделей систем и создание на базе машин реального времени прототипов блоков управления систем или имитаторов окружения для этих блоков для проверки их функционирования [1].

На основе этого подхода предлагается разработать такую мобильную тестирующую систему, задача которой – провести быстрое автоматическое тестирование электрооборудования бортовых систем и диагностику неисправностей непосредственно на самолете.

Такая система будет представлять машину реального времени [2] с крейтом преобразующих и коммутирующих устройств, необходимых для проверки оборудования самолетов, и управляющий компьютер со специализированным программным обеспечением, содержащим функциональные модели принципиальных схем и устройств. Данная система позволит иметь обширный функционал для реализации проверок всего ЛА за счёт наличия функциональных блоков, набора разъемов, а также электрожгутов различных размеров.

Ключевые функции:

1. Прозвон всех типов цепей.
2. Прототипирование блоков. В ходе прототипирования создается модель, которая имитирует взаимодействие пользователя с интерфейсом объекта и выполняет все функции данного блока, то есть проверка системы осуществляется без самого блока, роль которого займет и осуществит данный стенд.
3. Контроль функционирования блока до установки на самолет по всем режимам по методике приемо-сдаточных испытаний. Машина реального времени, содержащая функциональную модель, будет выдавать в блок тестовые сигналы, принимать выходные сигналы блока и анализировать исправность его работы.

В основе работы мобильного стенда проверок положены база тестирующих программ и инструкции по управлению для организации проверки. Тестирующие программы с помощью машины реального времени и специальной коммутирующей коробки для конкретной проверки будут подавать сигналы, а система сможет проанализировать и дать заключение на основе полученных обратных сигналов.

В настоящее время проверка состояния работоспособности системы управления самолета занимает большое количество времени и ресурсов. Внедрение автоматизированного стенда позволит кардинально изменить ситуацию. Прогнозируется сокращение временных и трудовых затрат за счет автоматизации процесса, что приведёт к сокращению цикла сборки.

1. Высвобождение кадров, которые были задействованные в ручной проверке. Теперь они могут работать уже над новой поставленной задачей.
2. Использование компактной версии системы проверок сделает процесс удобным и уменьшит затрачиваемое на хранение пространство. Существующие системы проверок являются крупногабаритными и требуют дополнительные ресурсы для хранения, транспортировки и использования.

3. Возможность локального определения неисправности, которая исключает необходимость поочередной замены блоков и проверки всего участка.
4. Продолжение процесса выпуска летательного аппарата – пропадает задержка цикла производства при отсутствии блока, при котором самолет может простаивать неопределенное количество времени.

Схематический пример эффективности стенда: прозвонка самолета в целом вручную занимает около месяца. На проверку опытной машиной на настоящее время уходит около десяти дней при наличии необходимых ресурсов. Данный стенд позволит ускорить процесс. Система подключается по инструкции, запускается процесс, контролируемый оператором. По завершении прогонки всей системы ЛА, стенд выдаст отчет, где будут прописаны неисправности при их наличии. При возникновении ошибки по данному отчету будет видно, в какой конкретно системе и в каком жгуте находится проблема. Ее устранят и потом запустят систему проверки локально для перепроверки конкретно этого места и подтверждения, что неисправность устранена.

Перспективы применения: проверка функционала и годности изделий, которые находятся в цехе входного контроля не только для заводов изготовителей, но и для организаций, которые поддерживают летную годность ЛА; а также создание автоматической контрольно-проверочной аппаратуры для обеспечения максимальной автоматизации всех процессов проверки на ЛА.

Список литературы

1. Тимофеев Даниил доклад «Полунатурное тестирование: стандартный подход к испытаниям в электротехнике», Конференция «Системное моделирование в управлении жизненным циклом разработки сложных изделий».
2. Электронный ресурс: Полунатурное моделирование и быстрое прототипирование с использованием российских комплексов РИТМ // КІПМ РИТМ: [сайт]. – 2023. – URL: <https://kpm-ritm.ru/ritm-article> (дата обращения: 29.04.2026).

УДК 004.896:621.396.96

ЖИТКОВ Р. В., МИХАЙЛОВ В. С., СВЯТОВ К. В.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

ОПИСАНИЕ ПОДХОДА К ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВАТС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ UWB В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ СПУТНИКОВОГО СИГНАЛА¹

***Аннотация.** В статье рассмотрен метод относительной локализации высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) в условиях отсутствия или нестабильности GNSS-сигнала. Предложен подход кооперативной навигации, при котором узлы UWB-сети выполняют взаимные измерения, формируют матрицу межузловых наблюдений и вычисляют координаты без жесткого деления на стационарные якоря и подвижные тэги. Описаны архитектура программно-аппаратного комплекса, методика испытаний и результаты обработки данных с применением фильтра выбросов и LSTM-модели. Показано, что кооперативная обработка повышает устойчивость позиционирования и обеспечивает среднеквадратическую ошибку порядка 40-70 см в типовых условиях эксплуатации наземных ВАТС. Предложенный подход будет полезен для решения задач локализации наземной сельскохозяйственной и складской техники.*

***Ключевые слова:** высокоточная навигация, UWB, высокоавтоматизированные транспортные средства, относительная локализация, кооперативная навигация, GNSS-denied, складская техника, точное земледелие, LSTM.*

Введение

Надежная локализация является базовым условием безопасного применения ВАТС в сельском хозяйстве и складской логистике. Для тракторных платформ, роботизированных тележек, погрузчиков и мобильных роботов координата используется не только для построения маршрута, но и для предотвращения столкновений, синхронизации движения нескольких машин, контроля технологической операции и регистрации выполненной работы. Вблизи металлических стеллажей, различной инфраструктуры и внутри помещений GNSS-сигнал затухает,

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00265, <https://rscf.ru/project/23-11-00265/>

появляются переотражения, поэтому требуется локальная система позиционирования, способная работать автономно и быстро разворачиваться в изменяемой рабочей зоне.

Технология Ultra Wide Band (UWB) является перспективной основой такой системы, поскольку измерение времени распространения импульсов радиосигнала дает высокую разрешающую способность по дальности и сравнительно высокую устойчивость к многолучёвости за счёт сверхширокой полосы частот. Стандарт IEEE 802.15.4z расширил возможности UWB за счет процедур ranging, направленных на повышение точности и целостности измерений [1]. В обзорах отмечается, что UWB применяется для локализации мобильных автономных роботов на промышленных объектах там, где оптические методы зависят от освещения, а одометрия быстро накапливает ошибку [2, 3]. Однако большинство практических решений строится по схеме «якорь-тэг», где стационарные точки заранее устанавливаются в известных координатах. Для складских и особенно сельскохозяйственных ВАС такая схема не всегда удобна: рабочая зона меняется, машины перемещаются группой, а часть радиолиний может временно закрываться техникой, грузом или элементами здания.

Научная новизна работы заключается в развитии подхода кооперативной навигации для наземных ВАС на базе самоорганизующейся UWB-сети. Каждый узел одновременно выступает источником измерений, ретранслятором навигационных данных и элементом распределенной геометрической конфигурации. Если одна машина теряет прямую видимость нескольких опорных точек, ее положение уточняется через соседние узлы, которые продолжают видеть и ее, и другие элементы сети. Таким образом, координаты оцениваются согласованно для группы ВАС, что важно при параллельном движении по агротехнологическим полосам, обслуживании складских рядов или формировании колонны машин.

Материалы и методы

Исследование выполнено на базе разработанного программно-аппаратного комплекса локального позиционирования. В варианте на модуле DW3000 (Рис. 1а) узел собран на базе ESP32S3, поддерживает UWB-канал 6,8/8 ГГц, интерфейсы USB, UART, CAN, I2C, SPI, Wi-Fi и Ethernet (через W5500). Было изготовлено шесть идентичных узлов; расчет координат и накопление навигационной матрицы выполнялись на микроконтроллере или на внешнем вычислителе Raspberry Pi 5. Второй вариант построен на МК8000 и STM32G431 (Рис. 1б), поддерживает измерение дальности и определение угла прихода сигнала AoA. Для него изготовлено пять узлов с четырехантенными UWB-модулями и одноантенными тэгами. Оба исполнения используют общую идею

самоорганизации и обмена навигационными данными между участниками сети.

Ключевым элементом обработки является матрица тэгов. Для каждой пары узлов в ней хранятся идентификаторы, расстояние, угол наблюдения в прямом и обратном направлении, а также номер измерения, применяемый для кэширования и согласования данных по принципу векторных часов.



Рисунок 1а (слева) – навигационный модуль на база DW3000, 1б (справа) – навигационный модуль на базе МК8000

Такая структура переводит набор независимых дальномерных измерений в граф связей между машинами: вершины соответствуют ВАТС или временным опорным узлам, а ребра задаются измеренными расстояниями и, при наличии AoA, углами. Координаты вычисляются в локальной системе, привязанной к выбранному базовому узлу (Рис. 2), началу складского ряда или стартовой точке рабочей полосы.

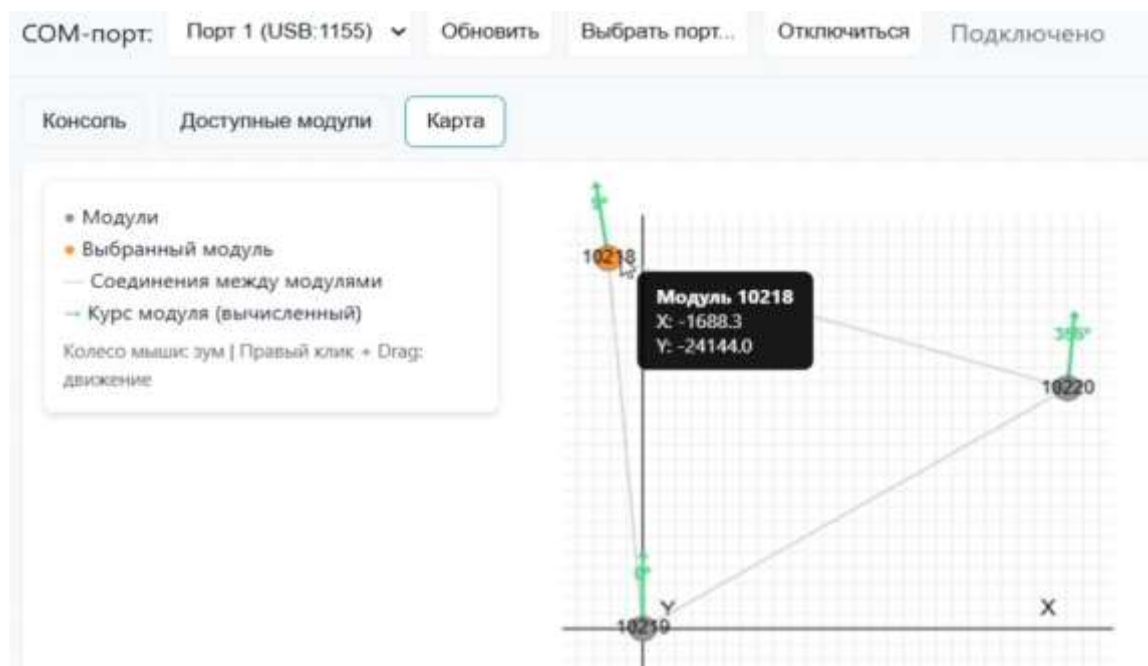


Рисунок 2 – Средство визуализации координат на основе матрицы тэгов

Методика включает три этапа. Сначала выполняется взаимное ranging-измерение между узлами сети по схеме TOF TWR и, для МК8000, уточнение наблюдений по AoA. Затем отбрасываются скачки, нарушающие физически допустимую скорость БАТС, и измерения с асимметрией прямого и обратного канала выше заданного порога. На заключительном этапе применяется LSTM-модель, обученная на последовательностях реальных UWB-измерений. Использование рекуррентной модели обосновано тем, что ошибка при переотражениях имеет временную структуру: серия смещенных измерений чаще соответствует появлению препятствия, а одиночный выброс может быть подавлен без потери динамики движения. Аналогичные идеи применения LSTM для повышения устойчивости UWB-позиционирования описаны в работах по indoor positioning [7].

Результаты исследования

Экспериментальная проверка проводилась с ноября 2025 г. по апрель 2026 г. в двух сценариях. Первый моделировал работу складской техники в коридоре между металлическими стеллажами и повороты мобильной тележки около зоны погрузки. Второй соответствовал сельскохозяйственной задаче: движение наземной платформы по технологической полосе и синхронизация с соседним мобильным узлом на расстоянии 3-500 м. Во всех опытах ГНСС-координата не использовалась в контуре навигации; контрольная траектория задавалась разметкой площадки и независимыми линейными измерениями. Для сравнения рассчитывались сырые измерения TOF TWR, фильтрованная оценка без кооперативного графа и предложенная кооперативная оценка с LSTM-обработкой матрицы тэгов.

Таблица 1. Результаты испытаний относительной локализации БАТС

Сценарий	Метод обработки	СКО, м	95 % ошибка, м	Потеря координаты, %
Складской коридор	TOF TWR без фильтрации	0,182	0,421	6,8
Складской коридор	Фильтр выбросов	0,071	0,163	2,4
Складской коридор	Кооперативная навигация + LSTM	0,046	0,098	0,7
Полоса агрополигона	TOF TWR без фильтрации	0,63	1,35	4,1
Полоса агрополигона	Кооперативная навигация + LSTM	0,38	0,84	2,5

Результаты показывают, что основной прирост точности связан не только с фильтрацией выбросов, но и с использованием избыточности

кооперативной сети. В складском сценарии среднеквадратическая ошибка уменьшилась с 18,2 см для сырых TOF-измерений до 4,6 см при совместной обработке матрицы тэгов и LSTM. В аграрном сценарии, где многолучевость была ниже, но менялась взаимная ориентация узлов, ошибка снизилась с 63 до 38 см. При перекрытии одной радиолинии положение продолжало оцениваться за счет альтернативных ребер графа, тогда как одиночная машина без кооперативных связей давала кратковременную деградацию координаты.

Практическая значимость

Эффективность подхода подтверждается и с точки зрения развертывания. В классической RTLS-схеме перед началом работы требуется точно измерить координаты стационарных якорей. В предлагаемой архитектуре часть узлов может быть установлена на самих БАТС, а часть – временно размещена на краях рабочей зоны. После включения сеть строит топологию взаимных измерений, выбирает устойчивые связи и формирует локальную систему координат. Такой режим соответствует концепции plug-and-play, где цель состоит в уменьшении стоимости ручной установки UWB-инфраструктуры и повышении адаптивности системы [5]. Для склада это позволяет быстро переносить зону работы между рядами, а для сельского хозяйства – разворачивать навигацию там, где постоянная инфраструктура экономически нецелесообразна.

Практическая ценность системы не ограничивается абсолютной координатой по опорной точке. В складской и аграрной эксплуатации часто важнее относительное положение: расстояние между роботизированными тележками, смещение агрегата относительно ведущей платформы, положение погрузчика относительно паллеты или безопасный интервал в узком проходе. Кооперативная навигация напрямую решает эту задачу и одновременно использует UWB-канал для обмена служебными сообщениями между узлами. Ограничения исследования связаны с тем, что UWB не устраняет полностью влияние металлических поверхностей, плотного груза и влажной растительности; дальнейшее развитие системы целесообразно связать с объединением UWB с инерциальными датчиками, колесной одометрией и картой рабочей зоны [6, 7].

Заключение

В работе предложен и экспериментально проверен подход относительной локализации БАТС на основе самоорганизующейся UWB-сети. Научная новизна состоит как в переносе принципов кооперативной навигации на группу наземных высокоавтоматизированных транспортных средств, работающих без GNSS-сигнала, так и в использовании матрицы межузловых измерений как единого источника данных для фильтрации,

самокалибровки и расчета координат. Практическая значимость заключается в быстром развертывании навигационной зоны в местах без постоянной инфраструктуры. Результаты испытаний подтвердили повышение точности и устойчивости: кооперативная обработка и LSTM уменьшили ошибку локализации в 3-4 раза по сравнению с сырыми UWB-измерениями и снизили вероятность потери координаты менее чем до 1 %.

Список литературы

1. IEEE Std 802.15.4z-2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Amendment: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE, 2020.
2. Al-Okby M., Junginger S., Roddelkopf T., Thurow K. UWB-Based Real-Time Indoor Positioning Systems: A Comprehensive Review. // Appl. Sci. 2024.
3. Xu Ning, Guan Mingyang, Wen Changyun. A survey on Ultra Wide Band based localization for mobile autonomous machines. // Journal of Automation and Intelligence. 2025.
4. Huang, Y., Cao, B. & Wang, A. Design a novel algorithm for enhancing UWB positioning accuracy in GPS denied environments. // Sci Rep 14. 23895 (2024).
5. Jiang Z., Arias O., Jacobson Q., Kumar P. R. Self-calibration and Collaborative Localization for UWB Positioning Systems: A Survey and Future Research Directions // ACM Transactions on Sensor Networks. 2021.
6. Yu X., Chuah M. C. Applications of UWB Networks and Positioning to Autonomous Robots and Industrial Systems // arXiv:2103.13488. 2021.
7. Xie K., Liu J., Wang S. Enhanced Agricultural Vehicle Positioning through Ultra-Wideband-Assisted Global Navigation Satellite Systems and Bayesian Integration Techniques // Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 8. 1396.

УДК 331

ЗАЙНУЛЛИНА Д.С., НАДРЕЕВА Л.Л.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Россия

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВИАСТРОЕНИИ: ФАКТОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ

***Аннотация.** В статье рассматривается роль цифровизации и автоматизации в повышении производительности труда в авиастроении. Анализируются ключевые технологии: PLM-системы, цифровые двойники, IoT, техническое зрение на базе ИИ, роботизация и аддитивные технологии. Выявлены основные барьеры внедрения (высокие издержки, дефицит кадров, интеграционные сложности). На основе данных ПАО «ОАК», Boeing и Airbus показано сохранение 4-5-кратного разрыва в производительности труда при положительной динамике в России.*

Обоснована необходимость комплексного подхода и государственной поддержки.

Ключевые слова: *цифровизация, автоматизация, производительность труда, авиастроение, PLM, цифровые двойники, искусственный интеллект, аддитивные технологии, ОАК, Индустрия 4.0.*

Авиастроение относится к числу наиболее наукоёмких и технологически сложных отраслей промышленности. Производство современного воздушного судна требует координации работы тысяч поставщиков, использования миллионов комплектующих и соблюдения жестких требований к качеству и безопасности. В этих условиях традиционные методы организации труда, основанные на бумажном документообороте и ручном управлении, достигают предела своей эффективности.

Цифровизация и автоматизация производственных процессов рассматриваются в мировой практике как основной инструмент преодоления «информационной перегрузки» и снижения трудоёмкости. Как отмечают И.С. Харкевич и Е.Н. Босая, внедрение цифровых технологий без перестройки организационной структуры и управленческих регламентов приводит к эффекту «оцифрованного хаоса» – когда данные есть, но они не используются для принятия решений [2, с. 158].

В экономической и технической литературе отсутствует единое определение цифровизации производства. Обобщая подходы различных авторов, можно предложить следующее определение: цифровизация производственных процессов – это системное внедрение цифровых технологий сбора, передачи, обработки и анализа данных на всех этапах производственного цикла, обеспечивающее сокращение затрат рабочего времени, повышение точности выполнения операций и снижение влияния человеческого фактора.

Автоматизация, в свою очередь, является более узким понятием и представляет собой передачу управляющих функций от человека к техническим устройствам. В современном авиастроении цифровизация и автоматизация неразрывно связаны: цифровые системы генерируют управляющие команды, а автоматизированные устройства (станки с ЧПУ, роботы, транспортеры) их исполняют.

На эффективность внедрения цифровых технологий на авиастроительном предприятии влияет совокупность факторов. Как подчеркивает Б.М. Генкин, результативность труда в наукоёмких отраслях определяется не столько скоростью выполнения операций, сколько точностью координации между исполнителями [1, с. 12].

В работе М.А. Масыча и Е.В. Капелюк отмечается, что количественная оценка эффективности цифровизации должна включать

также социальные аспекты – снижение тяжести и монотонности труда, уменьшение числа травм на производстве [3, с. 45].

К числу ключевых факторов, определяющих успех цифровой трансформации, относятся:

1. Технологические факторы – уровень развития цифровой инфраструктуры, совместимость информационных систем (PLM, ERP, MES), зрелость цифровых технологий.

2. Организационные факторы – готовность руководства к реинжинирингу бизнес-процессов.

3. Человеческие факторы – уровень цифровой грамотности персонала, готовность к непрерывному обучению, психологическое восприятие изменений.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение цифровых технологий в авиастроении сталкивается с серьезными препятствиями. По данным Д.В. Васильева и Д.С. Коптева, мировая статистика показывает, что до 29 % инициатив цифровой трансформации в аэрокосмической промышленности полностью проваливаются, 69 % компаний получают лишь промежуточные результаты, и только 3 % всех инициатив признаются успешными [4, с. 107].

Причинами такого положения выступают:

1. Финансовые ограничения – стоимость комплексного внедрения PLM+MES+ERP для крупного авиастроительного завода может достигать десятков миллионов долларов.

2. Сложность интеграции – авиастроительные предприятия используют оборудование разных поколений, подключать которое к единой цифровой сети технически сложно.

3. Кадровый дефицит – требуются специалисты, одновременно разбирающиеся в технологиях производства и в цифровых системах.

Кибербезопасность – рост числа подключенных устройств увеличивает поверхность для атак.

Особую проблему представляет «парадокс производительности», описанный Р. Солоу еще в 1987 году. Применительно к авиастроению он проявляется в том, что в первые 12-18 месяцев после внедрения цифровых технологий производительность труда не растет, а может даже снижаться. Причина – время, необходимое для обучения, наладки и адаптации организационных регламентов.

Современный этап цифровой трансформации авиастроения характеризуется конвергенцией нескольких технологических направлений, подробно описанных в работе В.Г. Харазова [5, с. 112-156].

PLM-системы управления жизненным циклом занимают центральное место в цифровой экосистеме авиастроительного предприятия. Они обеспечивают единое информационное пространство для всех участников производственного процесса – от конструкторского бюро до сервисного

центра. Возможность параллельной работы («конкурентный инжиниринг») позволяет сократить время проектирования новых изделий с 5-7 лет до 2-3 лет.

Промышленный интернет вещей (IIoT) обеспечивает сбор данных с оборудования в реальном времени. Датчики вибрации, температуры, потребляемой мощности, установленные на станках с ЧПУ, позволяют не только отслеживать текущее состояние, но и прогнозировать отказы.

Цифровые двойники (Digital Twin) представляют собой виртуальные копии физических объектов (изделия, цеха, производственной линии). В авиастроении цифровые двойники используются для отработки технологических режимов обработки без риска испортить заготовку, моделирования логистических потоков на сборочном стенде и обучения персонала.

Техническое зрение на основе искусственного интеллекта заменило визуальный контроль во многих операциях. Скорость контроля возрастает в 5-10 раз, при этом вероятность пропуска дефекта снижается с 2-3 % до 0,1-0,5 %.

Если цифровизация отвечает за сбор и обработку информации, то автоматизация – за физическое выполнение операций без участия человека. В авиастроении уровень автоматизации варьируется в широких пределах в зависимости от типа производства.

Оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ) стало стандартом для механообрабатывающих цехов. Современные пятикоординатные обрабатывающие центры способны за одну установку заготовки выполнить фрезерование, сверление, растачивание и контроль размеров.

Промышленные роботы традиционно применялись в авиастроении ограниченно – из-за мелкосерийного характера производства. Однако появление коллаборативных роботов (cobots), способных работать рядом с человеком без ограждений и быстро перепрограммироваться, изменило ситуацию.

Аддитивные технологии (3D-печать) меняют саму логику производства. Вместо вырезания детали из заготовки происходит послойное наращивание материала только там, где он нужен. Для авиастроения, где масса детали имеет критическое значение, это особенно актуально.

Если рассмотреть мировой рынок гражданской авиации, то можно заметить дуополию, где выделяются 2 лидера: «Boeing» и «Airbus». Именно к этим корпорациям относятся более 90 % новых реактивных пассажирских самолетов [6; 7]. Доминирование данных компаний заключается не только в использовании высокотехнологичных инструментов, но и в качественно ином уровне производительности труда.

Согласно годовым отчетам, производительность в Boeing и Airbus составляет от 400 до 550 тысяч долларов на одного работника в год [6; 7].

Для сравнения, анализ производительности труда в ПАО «Объединённая авиастроительная корпорация» (ОАК) за 2023-2025 гг. показывает, что производительность труда выросла на 88,6 % при росте численности персонала всего на 6 % [8]. Однако абсолютное значение производительности труда (около 100-110 тыс. долл./чел. в год по среднегодовому курсу) по-прежнему в 4–5 раз ниже, чем в Boeing и Airbus. Таким образом, несмотря на положительную динамику, разрыв в эффективности с мировыми лидерами сохраняется [8].

В Российской Федерации сформирована система государственных программ, направленных на повышение производительности труда, в том числе в авиастроительной отрасли. Государственная программа «Развитие авиационной промышленности» на период до 2030 года включает мероприятия по техническому перевооружению производственных мощностей, внедрению цифровых технологий и автоматизации [9].

В рамках данной программы финансируются проекты по созданию цифровых платформ управления жизненным циклом изделий (PLM-систем), что непосредственно влияет на сокращение времени проектирования и производства [9].

Среднесрочные прогнозы развития авиастроения связывают дальнейший рост производительности труда с внедрением технологий, которые сегодня находятся на стадии экспериментальных образцов.

Когнитивные технологии и промышленный искусственный интеллект следующего поколения будут не просто обрабатывать данные по заданным алгоритмам, а самостоятельно выявлять скрытые закономерности и предлагать оптимальные технологические решения.

Квантовые вычисления в перспективе 5-7 лет могут быть применены для задач, требующих перебора огромного количества вариантов – расчета аэродинамики, оптимизации расположения сотен тысяч крепежных отверстий, планирования загрузки производственных мощностей. Ускорение таких расчетов в тысячи раз принципиально изменит процесс проектирования и подготовки производства.

Цифровизация и автоматизация производственных процессов являются главным инструментом повышения производительности труда в современном авиастроении. Комплексное внедрение PLM, ERP, MES-систем, промышленных роботов, аддитивных технологий и систем технического зрения позволяет сократить трудоемкость изготовления сложных агрегатов в 1,5-2 раза, уменьшить производственный цикл на 30-50% и снизить долю брака.

Однако достижение этих эффектов требует преодоления существенных барьеров: высокой стоимости внедрения, сложности интеграции разнородных систем, дефицита квалифицированных кадров и

временного снижения производительности в адаптационный период [2; 4]. Успех цифровой трансформации в равной степени зависит как от выбора технологий, так и от организационных изменений – перестройки регламентов, обучения персонала, создания системы мотивации за использование цифровых инструментов [1; 3].

Как показывают данные отчетности ОАК, российское авиастроение демонстрирует положительную динамику производительности труда, однако разрыв с мировыми лидерами (Boeing, Airbus) сохраняется и составляет 4-5 раз [6; 7; 8]. Дальнейшее сокращение этого отставания требует как масштабных инвестиций в технологии, так и эффективного использования механизмов государственной поддержки, предусмотренных отраслевой госпрограммой [9].

Список литературы

1. Генкин, Б.М. Экономика и социология труда [Электронный ресурс]: учебник для вузов / Б.М. Генкин. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: Норма, 2023. – 464 с. – Форма доступа: <https://znanium.ru/catalog/product/2034567> (дата обращения: 20.04.2026).
2. Харкевич, И.С. Цифровая трансформация промышленности: эффекты и риски / И.С. Харкевич, Е.Н. Босая // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 2. – С. 154-160.
3. Масыч, М.А. Производительность труда: системный анализ факторов и резервов / М.А. Масыч, Е.В. Капелюк // Вестник СибГАУ. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 340-347.
4. Васильев, Д.В. Цифровая трансформация аэрокосмической промышленности: вызовы и решения / Д.В. Васильев, Д.С. Коптев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 105-112.
5. Харазов, В.Г. Интеллектуальные системы в машиностроении [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Г. Харазов. – М.: Машиностроение, 2023. – 356 с. – Форма доступа: <https://znanium.ru/catalog/product/2012345> (дата обращения: 25.04.2026).
6. Boeing. Annual Report 2024 [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://www.boeing.com/investors> (дата обращения: 28.04.2026).
7. Airbus SE. Annual Report 2024 [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://www.airbus.com/company/financial> (дата обращения: 30.04.2026).
8. ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация». Годовые отчеты за 2023-2025 гг. [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://www.uacrussia.ru/ru/investors> (дата обращения: 30.04.2026).
9. Распоряжение Правительства РФ от 25.06.2022 № 1693-р «Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года». – 2022. – Форма доступа: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-25062022-n-1693-r/> (дата обращения: 30.04.2026).

УДК 681.51

ИЛЬИНА О. Н.

Балтийский государственный технический университет «Военмех»
им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

***Аннотация.** В статье рассматриваются принципы формирования унифицированной модели метрологических данных для авиастроительной отрасли, обеспечивающей сквозную прослеживаемость от координатно-измерительных машин до цифрового двойника изделия с использованием отечественных протоколов обмена данными. Обоснована архитектура автоматизированной системы метрологического контроля, интегрирующая технологии «Индустрии 4.0» и «Индустрии 5.0» в замкнутый контур управления качеством изготовления деталей. Показано, что внедрение разработанного подхода повышает метрологическую стабильность, снижает зависимость от зарубежных решений и обеспечивает технологический суверенитет отрасли.*

***Ключевые слова:** «Индустрии 4.0», «Индустрии 5.0», метрологический контроль, координатно-измерительные машины, импортозамещение, DMIS, замкнутый контур.*

В настоящее время в производственных процессах контроля деталей при изготовлении авиационной техники применяются зарубежные контрольно-измерительные машины (КИМ) с импортным программным обеспечением (ПО), что создает зависимость, ограничивающую развитие собственных технологий и их интеграцию, обеспечивающих цифровизацию и автоматизацию производственных процессов в авиастроительной отрасли. Обеспечение технологического суверенитета [1] страны требует кардинальной замены зарубежных метрологических экосистем на отечественные решения без потери точности, прослеживаемости, надежности, безопасности и соответствия отраслевым нормам.

В данной статье рассматривается разработка и обоснование архитектуры импортозамещающей автоматизированной системы метрологического контроля деталей авиационной техники с применением цифровых двойников и предиктивной аналитики для интеграции с отечественными КИМ [2, 3], САПР/PLM-системы и MES-платформы на базе открытых стандартов обмена данными. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) сформировать требования к метрологическому контуру с учётом стандартов РФ и ограничений иностранного ПО;
- 2) разработать протоколы обмена данными и программной архитектуры интеграции КИМ–CAD–MES;
- 3) создать алгоритмы предиктивного анализа отклонений и автоматической генерации рекомендаций для коррекции техпроцесса.

Анализ современного состояния и выявленный разрыв

Стремление к развитию российского измерительного оборудования и систем, а также формирование условий для обеспечения технологического суверенитета страны требуют создания отечественных управляющих измерительных систем и их протоколов, разработки подходов к контрольному оборудованию с учетом его интеграции и соответствия измерительных протоколов требованиям авиационной промышленности и современных технологий искусственного интеллекта.

Глобальный тренд внедрения технологий «Индустрии 4.0» формирующий цифровизацию контроля с помощью координатно-измерительных машин (КИМ) с программным управлением обеспечивает производство деталей требуемого качества. Применение технологии «Индустрии 4.0» для контроля качества деталей в авиастроении такие как цифровые двойники изделий и процессов, предиктивная аналитика и промышленный IoT, автоматизированные системы способствуют повышению автоматизации, минимизации человеческого фактора, уменьшению затрат человеческих ресурсов на монотонные измерительные операции, повышению надежности и качества производства.

Внедрение в функционирование КИМ принципов «Индустрии 5.0» обеспечивает человеко-ориентированное взаимодействие с оператором и повышает устойчивость контрольно-измерительных процессов к отклонениям при сдаче изготовленных деталей для авиации.

Интеграция технологий «Индустрии 4.0» и «Индустрии 5.0» в контрольно-измерительный процесс изготовления деталей для авиационной техники и обеспечение их включения в программно-аппаратный комплекс КИМ, возможно благодаря трем основным аспектам, учитывающие национальные стандарты Российской Федерации (РФ) для соответствующих отраслей промышленности и направлений, а именно:

- создания собственной импортозамещающей технологии;
- разработки и изготовления измерительного оборудования на базе отечественных технологий и производств;
- формирование отечественного ПО.

Архитектура замкнутого контура управления качеством

Базовым элементом предлагаемой архитектуры является замкнутый контур обмена данными, реализующий автоматизированный сбор, анализ и использование метрологической информации. Ключевая роль на уровне КИМ принадлежит существующему международному стандарту Dimensional Measuring Interface Standard (DMIS) ISO 22093:2011 [4]. Стандарт DMIS предназначен для обмена данными и программами измерений между системами геометрических измерений, измерительными машинами и САПР, который обеспечивает независимость программ от оборудования, позволяя переносить процедуры контроля между машинами разных производителей. В РФ DMIS официально не представлен в виде национального стандарта. Отсутствие собственного стандартизированного метрологического протокола, являющегося фундаментальным элементом унифицированной архитектуры обмена метрологическими данными, является сдерживающим ограничительным фактором развития технологического суверенитета.

Повышению управления качеством готовой продукции способствует внедрение цифровых двойников и предиктивной аналитики, которые заключаются в переходе от выявления брака к прогнозному отклонению и последующей корректировке управляющих программ. Отечественная нормативная база в сфере метрологии, КИМ, ПО, авиастроения и защиты информации требует адаптации под отечественные программные комплексы.

Анализ показывает, что зарубежные решения обеспечивают сквозную цифровизацию в производственные процессы. Однако их применение в РФ ограничено, что усложняет создание независимых собственных производственных процессов и технологий. Отечественные КИМ и их ключевые узлы изготавливаются в основном на базе зарубежных комплектующих, что ограничивает их функциональные возможности и затрудняет внедрение решений в рамках технологий «Индустрии 4.0» и «Индустрии 5.0».

Большинство предприятий осуществляет традиционный метрологический контроль с помощью измерительных средств или КИМ, результаты которых фиксируются в бумажном или электронном протоколе, а корректировка технологических процессов в случае необходимости осуществляется вручную. Современный подход основан на применении замкнутого контура управления качеством, который включает измерение фактической геометрии деталей и непрерывный обмен данными между измерительными и производственными системами, обеспечивая принятие решений и изменений параметров процесса без участия человека. Замкнутый контур реализует итеративный цикл управления качеством (рис. 1), который осуществляется по следующему алгоритму:

1. Детектирование: КИМ выявляет систематическое отклонение.
2. Анализ: MES агрегирует данные по партии, строит контрольные карты Шухарта, классифицирует отклонение.
3. Решение: PLM верифицирует, что отклонение укладывается в допустимые корректировки без изменения конструкторской документации; генерирует пакет смещений.
4. Исполнение: MES передает компенсационные коэффициенты на ЧПУ. Станок применяет корректировку к следующей детали или к текущей траектории.
5. Верификация: Повторное измерение подтверждает сходимость процесса. Цикл замыкается.

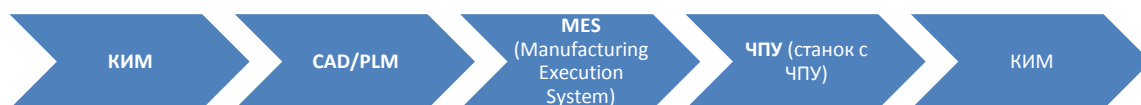


Рисунок 1 – Алгоритм функционирования замкнутого контура управления качеством

Протоколы и стандарты обмена данными. Принципы формирования отечественной архитектуры

В условиях импортозамещения приоритетными протоколами и стандартами обмена данных являются открытые и адаптируемые стандарты. К таким стандартам относятся:

- CAD ↔ КИМ: STEP AP242 (Model-Based Definition), содержащий геометрию и PMI; QIF 3.0 (Quality Information Framework) для передачи измерительных планов, результатов и метаданных; ISO 10360 для метрологической аттестации [5].

- PLM ↔ MES: Архитектура ISA-95, обмен через REST/gRPC API, форматы XML/JSON с валидацией по отраслевым схемам. В РФ применяется ГОСТ 34.601-90, ГОСТ Р 57700-2017 (цифровые двойники).

- MES ↔ ЧПУ: MTConnect (адаптивный мониторинг), OPC UA (безопасный промышленный обмен), отечественные расширения на базе ГОСТ Р МЭК 62541. Интеграция с российскими ЧПУ-контроллерами требует разработки драйверов-адаптеров для трансляции смещений и статусов.

Передача данных должна осуществляться машиночитаемом виде для обеспечения автоматической обработки, SPC-аналитики и замкнутой коррекции. Отечественная архитектура экосистем должна формироваться на применении следующих принципов:

1. Разработка отечественных измерительных контроллеров, ПО на базе российских САПР и специализированных метрологических модулей за счёт встраивания их в КИМ и ПО измерений.

2. Использование российских программных продуктов T-Flex PLM, ЛОЦМАН: PLM, 1С: ERP + отечественные MBD-расширения, поддержка STEP AP242 и PMI [6].

3. Использование систем управления производственными процессами и статистического контроля процессов, например 1С: MES, Галактика АММ, АСУ ТП на базе ОС Альт/ Astra Linux, модули статистического контроля (разрабатываются в рамках ГОСТ 34.xxx).

4. Использование ЧПУ – интерфейсов на базе российских драйверов, адаптеры OPC UA/MTConnect с сертификацией ФСТЭК [7].

5. Применение отечественных нормативных документов: ГОСТ РВ 0015-002, ОСТ 1 90xxx, ГОСТ Р ИСО 10360, включая обеспечение прослеживаемости результатов измерений и защиту данных.

На рисунке 2 представлена общая схема принципов формирования отечественной архитектуры для цифровизации и автоматизации производственных процессов контроля изготовления деталей.

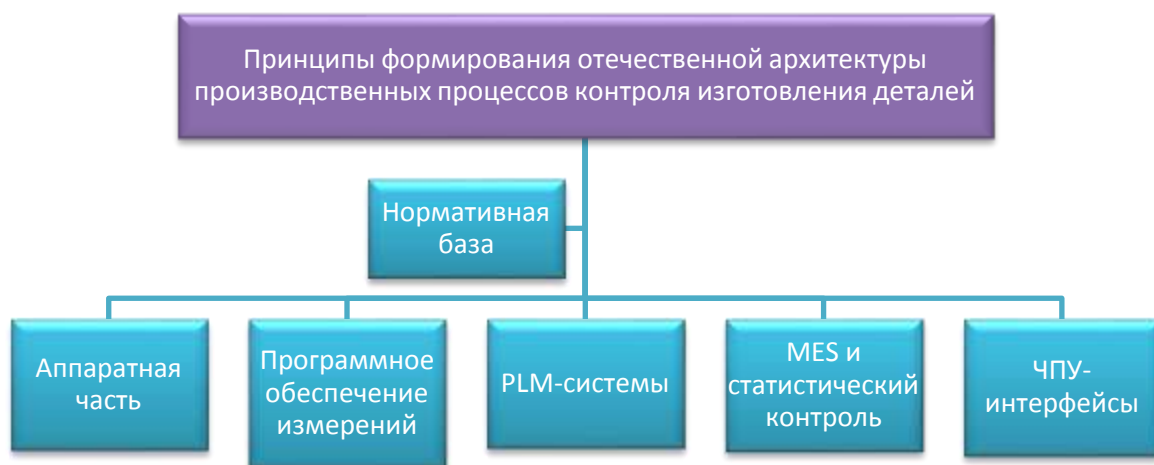


Рисунок 2 – Схема принципов формирования отечественной архитектуры автоматизации контроля

Научная новизна и практическая значимость

Формирование импортозамещающей технологии для контроля деталей авиационной техники требует разработки и сертификации ПО для метрологических вычислений по ГОСТ Р 8.568 (аттестация измерительных алгоритмов) и их последующего внедрения в КИМ.

В импортозамещающей архитектуре рекомендуется использовать гибридный подход: DMIS – для низкоуровневого управления КИМ либо разработанный отечественный аналог, QIF/STEP AP242 – для обмена с PLM/MES.

Учет вышеуказанных факторов создает унифицированную модель метрологических данных для авиастроительной промышленности, обеспечивающую сквозную прослеживаемость от КИМ до цифрового двойника изделия с использованием отечественных протоколов обмена.

Алгоритм предиктивной аналитики обеспечивает связывание исторических данных измерений КИМ с параметрами обработки на ЧПУ для прогнозирования отклонений формы до выхода детали за допуски.

Человеко-центричный подход (Индустрия 5.0) с технологиями искусственного интеллекта поддерживает принятие решений оператором.

Формирование технических решений по разработке и интеграции в КИМ импортозамещающей технологии в контрольный процесс деталей обеспечивает бесперебойный контроль качества в условиях внешних ограничений, повышает технологический суверенитет.

Предлагаемая архитектура масштабируема на другие отрасли (машиностроение, приборостроение).

Заключение

Выявленный разрыв заключается в отсутствии отечественной нормативно-согласованной архитектуры метрологического контроля, объединяющей аппаратную часть, ПО обмена данными, алгоритмы предиктивной аналитики и человеко-центричные интерфейсы в соответствии с требованиями авиастроительной отрасли.

Сформированная архитектура позволяет преодолеть выявленный разрыв за счет интеграции открытых стандартов и создания отечественных программно-аппаратных решений, обеспечивая замкнутый контур управления качеством выпускаемой продукции и технологический суверенитет авиастроительной отрасли.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 22.02.2024)

2. Ильина О.Н., Никитин В.В. Перспективность разработки методов диагностики и управления информационно-измерительных систем с использованием искусственного интеллекта // «Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП)» Сборник тезисов докладов III Всероссийской молодёжной научной конференции. г. Санкт-Петербург, Издательство: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025 – с. 180 – 181.

3. Ильина О.Н., Никитин В.В. Интеллектуализация координатно-измерительных машин: переход к цифровым методам контроля // публикация в сборнике трудов научно-практической конференции «VI Конференции Молодёжного научно-инженерного центра» г. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. 2026. С. 121-124.

4. ISO 22093:2011. Industrial automation systems and integration – Physical device control – Dimensional Measuring Interface Standard (DMIS). Geneva: ISO, 2011.

5. ГОСТ Р ИСО 10360-1-2019. Координатно-измерительные машины. Приёмочные и поверочные испытания. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2019.

6. ГОСТ Р ИСО 10303-1-2022. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1.

Общие представления и основополагающие принципы. – Москва: Российский институт стандартизации, 2022.

7. ГОСТ Р 71806-2024 Цифровая промышленность. Унифицированная архитектура ОРС. Часть 1. Обзор и концепции. – Москва: Российский институт стандартизации, 2025.

УДК (658.5 + 629.7)

КОЗЫРЕВА У.Р., БОРИСОВА Е.В.

Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СМК НА ЭТАПАХ ЖЦ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

***Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы интеграции цифровых технологий в системы менеджмента качества на всех этапах жизненного цикла авиационной техники. Проанализированы требования стандартов ГОСТ Р 58849-2020, ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и ГОСТ Р 58876-2020 в контексте цифровизации производственных процессов авиастроительной отрасли. Предложена модель управления качеством на основе цифровых двойников и сквозной прослеживаемости данных. Показана эффективность применения процессного подхода и риск-ориентированного мышления при внедрении цифровых решений. Особое внимание уделено проблемам замещения зарубежных информационных систем отечественными аналогами.*

***Ключевые слова:** система менеджмента качества, СМК, ГОСТ Р 58849-2020, ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ Р 58876-2020, авиационная техника, жизненный цикл, управление программой, управление требованиями, цифровые технологии, PLM-системы*

Современное авиастроение находится на этапе фундаментальной трансформации [0,0,0,0], обусловленной необходимостью импортозамещения программного обеспечения, повышением требований к качеству и безопасности авиационной техники (АТ), а также ускорением темпов технологического развития в контексте четвертой промышленной революции. В таких условиях интеграция систем менеджмента качества (СМК) и цифровых технологий становится фактором конкурентоспособности предприятий отрасли.

На рисунке 1 представлена структура управления программой создания АТ по ГОСТ Р 58849-2020 [0].

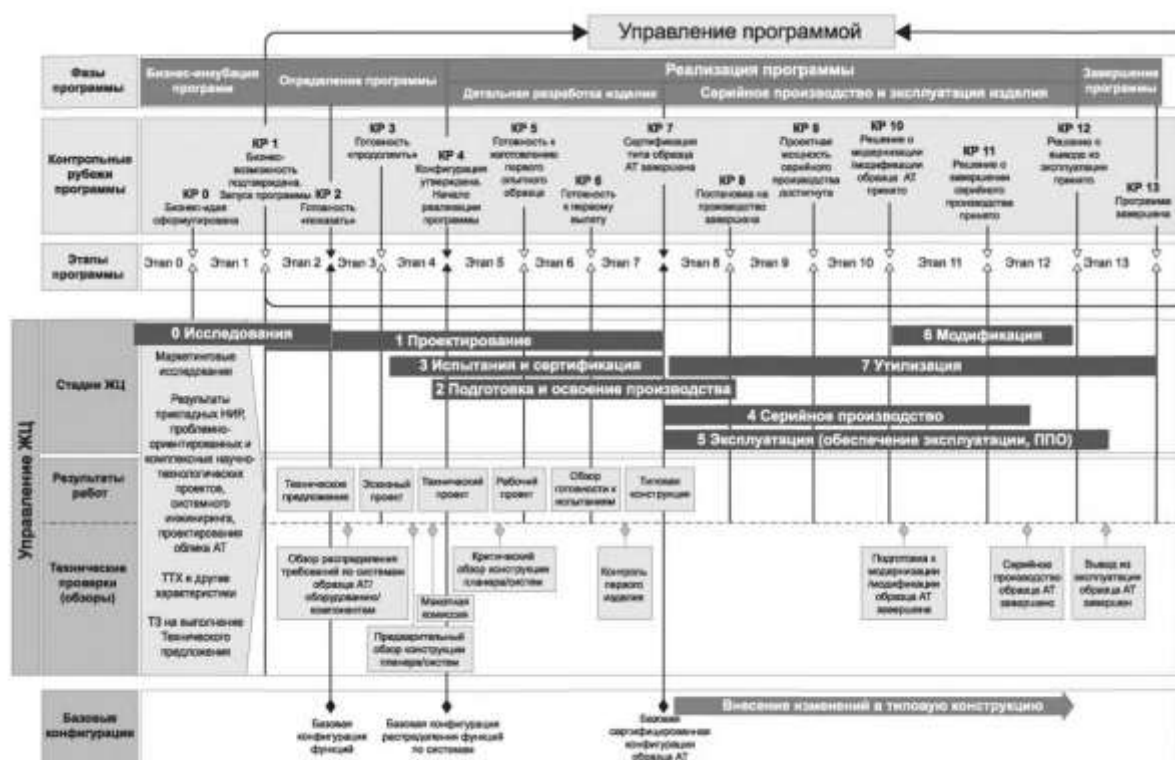


Рисунок 1 – Пример соответствия фаз, контрольных рубежей и этапов программы создания АТ стадиям жизненного цикла (источник: ГОСТ Р 58849-2020)

Программа создания АТ синхронизирована с контрольными рубежами (КР 0-13) и стадиями жизненного цикла. На этапах бизнес-инкубации и определения программы (КР 0-5) цифровизация направлена на формализацию требований через CRM/BI-платформы и создание электронных макетов как подлинников КД. В фазе детальной разработки и подготовки производства (КР 5-7) внедряются САПР/CAE и специализированные средства управления требованиями, обеспечивающие сквозную прослеживаемость. В серийном производстве (КР 7-11) интеграция MES, SPC и IoT-датчиков позволяет реализовать статистическое управление процессами, автоматизированный контроль состояния среды. На этапе эксплуатации и завершения (КР 11-13) предиктивное обслуживание и анализ больших данных об эксплуатации замыкают контур обратной связи для непрерывного улучшения.

Механизм обеспечения непрерывности и сквозной прослеживаемости требований является ядром цифровизации СМК и опирается на единый цифровой контур требований, связывающий исходные технические задания с моделями архитектуры, конструкторско-технологической реализацией, протоколами испытаний в среде PLM-систем. Управление изменениями при таком механизме должно строиться на обязательной процедуре запросов на изменение с автоматическим прослеживанием влияния на все элементы жизненного цикла. Цифровой двойник СМК

фиксирует конфигурационные базовые версии, обеспечивает аудиторский след и формирует доказательную базу для сертифицирующих органов.

Интеграция цифровых технологий в СМК в авиастроении позволяет не только автоматизировать рутинные операции, но и системно следовать требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [0].

Корреляция разделов ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и цифровых инструментов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Ключевые требования ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и примеры цифровых инструментов, применимых для реализации требований

Раздел ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Ключевые требования	Цифровые инструменты
4.Среда организации	Анализ внутренней/внешней среды, потребностей заинтересованных сторон, определение границ СМК	BI-платформы мониторинга рынков, CRM-системы сбора обратной связи, описание процессов (BPMN)
5. Лидерство	Политики, распределение ролей, ответственности, вовлечённость руководства	Дашборды руководства в реальном времени, автоматизированные маршруты согласований
6. Планирование	Управление рисками и возможностями, целеполагание, планирование изменений	реестры рисков с предиктивной аналитикой, симуляционное моделирование
7. Средства обеспечения	Ресурсы, компетенции, инфраструктура, документированная информация	LMS/VR-обучение, IoT-мониторинг оборудования, базы знаний с AI-поиском Электронный документооборот Цифровые макеты
8. Деятельность на стадиях ЖЦ продукции и услуг	Планирование операций, управление требованиями, проектирование, закупки, производство, выпуск, несоответствия	MES-диспетчеризация, SPC-модули Виртуальные испытания
9. Оценка результатов деятельности	Мониторинг, измерения, анализ, внутренние аудиты, анализ со стороны руководства	BI-аналитика, автоматизированные чек-листы аудитов
10. Улучшение	Корректирующие действия, непрерывное улучшение	AI-оптимизация параметров процессов, цифровые доски Kaizen

Следует подчеркнуть эффекты интеграции цифровых технологий в процессы авиастроительных предприятий. Как показывает практика предприятий вертолетостроения, применение электронного цифрового

макета позволило сократить сроки от начала разработки до получения готового изделия – лопасти в 2 раза, использование САПР ТП позволило снизить трудоемкость разработки на 40-60%, а замена стендовых ресурсных испытаний виртуальными – позволила снизить трудоемкость разработки в два раза [0].

Критическим барьером интеграции СМК и цифровых технологий остается импортозамещение информационных систем [0,0]. Отечественные PLM/ERP/MES-платформы зачастую уступают зарубежным аналогам в функциональной оснащенности, производительности, масштабируемости и совместимости. ИТ-решения, применяемые на предприятиях авиастроения, часто модифицированы под особенности локальных бизнес-процессов, что обусловлено спецификой управления жизненным циклом авиационной техники и требованиями отраслевых стандартов.

Учащение кибератак диктует необходимость встроенной киберзащиты, а дефицит зрелых отраслевых продуктов перекладывает на разработчиков программного обеспечения (ПО) задачи по обеспечению миграции данных и техническому сопровождению. Решение требует поэтапного внедрения, разработки отраслевых стандартов обмена данными и подготовки кадров, совмещающих компетенции в области СМК и цифровых технологий.

Несмотря на необходимость полного перехода на отечественные решения, предприятия сталкиваются с дефицитом зрелых отраслевых продуктов и квалифицированных кадров, способных работать с новыми платформами в контексте требований авиастроения. На плечи системных интеграторов ложатся дополнительные сложности: отсутствие развитых экосистем и совместимости ПО, проблемы интеграции с унаследованными системами, обеспечение сопровождения и развития внедренных решений.

Применение процессного подхода и риск-ориентированного мышления, установленных ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ Р 58876-2020 [0] в сочетании со структурой управления программами по ГОСТ Р 58849-2020 создает методологическую основу для цифровой трансформации авиастроения.

Интеграция СМК и цифровых технологий в авиастроении представляет собой виртуальную модель, которая в реальном времени отражает состояние всех процессов СМК и обеспечивает:

- единое информационное пространство – централизованное хранилище всех требований, данных о процессах;
- сквозную прослеживаемость – возможность отслеживания выполнения требований на всех этапах жизненного цикла изделия;
- интеграцию разнородных систем – взаимодействие PLM/ERP/MES/QMS систем в режиме реального времени;
- мониторинг и анализ процессов – сбор, обработку и визуализацию данных о состоянии процессов СМК;

- поддержку принятия решений – предоставление руководству актуальной информации для оперативного управления качеством;
- автоматизацию документооборота – электронное ведение технической документации с версионным контролем и обеспечением юридической значимости;
- предиктивную аналитику – прогнозирование потенциальных несоответствий и рисков на основе анализа больших данных.

В заключение следует отметить, что интеграция СМК и цифровых технологий в соответствии с национальными стандартами формирует сквозную систему управления качеством АТ. Успешное импортозамещение возможно при условии синхронизации технических решений с процессами СМК, развития открытых стандартов создания единого цифрового контура предприятия, что обеспечит повышение конкурентоспособности и устойчивое развитие отечественного авиастроения в условиях цифровой трансформации и технологического суверенитета.

Список литературы

1. Воробьев, А. П. Цифровые технологии в вертолетостроении. Текущее состояние, развитие и импортонезависимость / А. П. Воробьев // Международный конгресс по аэронавтике : Сборник тезисов, Москва, 04–05 декабря 2023 года. – Москва: Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. – С. 670-672. – EDN CXSSLV.
2. Стратегическое планирование авиастроительной отрасли в условиях импортозамещения информационных систем и технологий / В. Д. Калачанов, Е. А. Ратникова, А. Н. Новиков, Г. И. Журкин // Естественно-гуманитарные исследования. – 2023. – № 2(46). – С. 115-125. – EDN SMMVJK.
3. Краснощеков, Д. В. Аспекты управления требованиями при разработке программного обеспечения в авиационной отрасли / Д. В. Краснощеков, Н. К. Горелиц, Е. В. Песков // ИТ-Стандарт. – 2018. – № 2(15). – С. 12-17. – EDN XYPYMX.
4. Глава 1. Особенности управления рисками предприятий авиастроительной отрасли в условиях цифровой экономики // Управление рисками цифровизации и цифровой трансформации предприятий авиастроительной промышленности. – Чебоксары : Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2025. – С. 9-75. – EDN NLQUEJ.
5. Зинченко, А. С. Инновационные механизмы управления современными предприятиями в условиях новой технологической концепции / А. С. Зинченко. – Москва : Издательство "Перо", 2020. – 156 с. – ISBN 978-5-00171-305-0. – EDN AYVXUB.
6. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М., 2015. 32 с
7. ГОСТ Р 58849-2020. Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения. М. 2020. 61 с.
8. ГОСТ Р 58876-2020 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования. М. 2020. 46 с.

9. Цифровизация промышленности. Обзор TAdviser // URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Обзор_Цифровизация_промышленности_2024 (дата обращения: 20.04.2026).

УДК 629.7.01

КУЛИКОВ Т.Н., ГОРЮНОВ С.В.

АО «Авиационный комплекс имени С. В. Ильюшина», г. Москва, Россия

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ РАСЧЁТЕ ПРИВОДОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИИ УСИЛИЙ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОВОДКАХ

***Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы кинематического расчёта приводов системы управления воздушным судном с учётом нелинейностей, возникающих при определении плеч действия силы. Проанализировано влияние геометрических особенностей механических проводок на величину моментов, приходящих на привод. Предложен подход к учёту малых нелинейностей, позволяющий повысить точность расчётов нагрузок в приводных системах.*

***Ключевые слова:** кинематический расчёт, привод, управляющая поверхность, механическая проводка, электро-дистанционная система управления, малые нелинейности, плечо действия силы, крутящий момент, нагрузка, геометрическая нелинейность.*

Введение. При проектировании системы управления самолётом важно обеспечить согласованную работу исполнительных механизмов, проводки и вычислительной части во всём диапазоне отклонений. На этапе кинематического расчёта выявляется, что зависимости между движением входного и выходного звеньев СУ часто нелинейны, особенно при преобразовании поступательного движения во вращательное и наоборот.

Постановка задачи

Рассматриваемая задача включает в себя два взаимосвязанных направления:

- определение параметров привода рулевой поверхности;
- анализ кинематики тяговой механической проводки управления.

В первом случае требуется определить геометрические и силовые параметры привода. Ключевым параметром является плечо навески R (кронштейн на отклоняемой аэродинамической поверхности, к которому крепится шток привода), которое определяет как кинематическую передачу перемещений, так и силовую загрузку привода. При этом из-за преобразования поступательного движения штока в вращательное движение руля эффективное плечо действия силы изменяется по ходу

движения, что приводит к нелинейной зависимости между перемещением штока и углом отклонения руля.

Во втором случае рассматривается механическая проводка управления, включающая тяги и качалки, соединяющие органы управления, исполнительные механизмы автопилота и датчики. Здесь требуется определить:

- зависимость угла выходного звена от входного;
- передаточные числа по перемещениям и усилиям;
- распределение нагрузок в элементах проводки.

Особенностью данной задачи является то, что при конечных углах поворота звеньев (более $10\text{--}15^\circ$) передаточные числа становятся функциями текущего положения системы, что требует отказа от линейных моделей в пользу геометрически точного расчёта.

Таким образом, расчёт сводится к решению геометрически нелинейной задачи с последующей оценкой силовых факторов и проверкой ограничений.

Методика расчёта привода рулевой поверхности.

В начале был рассмотрена двумерная задача расчёта привода управления рулевой поверхностью с аналитическим подходом. Привод в данном случае имеет неподвижную точку закрепления в крыле/киле, вращающийся вокруг этой точки корпус и шток поступательного движения и в дальнейшем будет обозначаться приводом I типа [2,3] (рисунок 1).

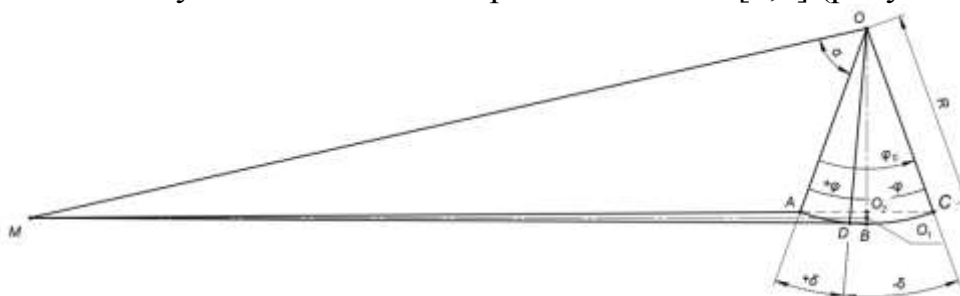


Рисунок 1 – Геометрическая задача привода I типа

Также был рассмотрен привод II типа с зафиксированным корпусом, шток которого имеет поворотную часть [2,3] (рисунок 2).

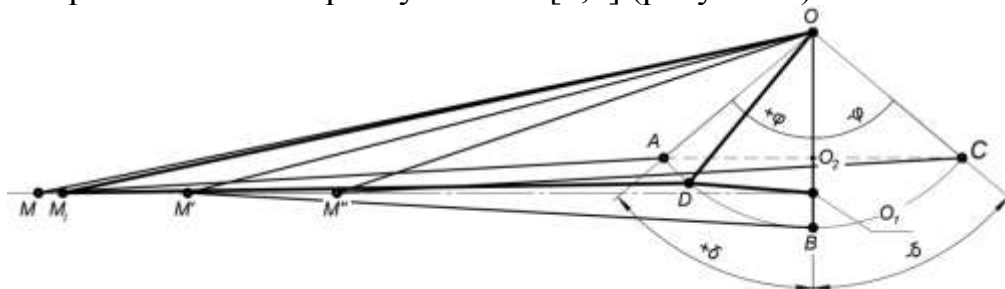


Рисунок 2 – Геометрическая задача привода II типа

Для обоих типов приводов были составлены аналитические зависимости нахождения угла отклонения плеча навески (рулевой поверхности) от хода штока, что позволяет найти плечо действия усилий от шарнирного момента на привод. В виду главного недостатка такого подхода в виде необходимости нахождения большого количества аналитических зависимостей под каждую задачу было принято решение об использовании координатного метода [1], так как в дальнейшем планируется переход к трёхмерной задаче.

Основная суть используемого координатного метода это задание неподвижных точек закрепления, относительно которых рассчитываются подвижные точки (звенья) на всех допустимых углах отклонения звеньев. Такой расчёт используется в итерационном алгоритме, позволяющим найти угол отклонения звена, при котором возникает максимальное силовое воздействие на другое звено (в данной конкретной подзадаче – привод).

Оба типа расчётов показали, что максимальное силовое воздействие от нагрузки на руле действует в точке минимального выдвижения штока (точка А на рисунках 1 и 2). Также стоит отметить, что оба расчёта на практике показали идентичные числовые результаты расчётов кинематических и силовых параметров.

В данном случае, при заданных геометрических параметрах расхождение рассчитанной нелинейной модели с линейной моделью, под которой подразумевается постоянное плечо R на всех углах поворота плеча навески, составляет около 6% на больших углах отклонения.

На основании данного расчёта была написана программа в среде MatLab, которая позволяет:

1. Подобрать R по известным $M_{ш}$ и рабочему ходу привода;
2. Подобрать требуемый ход привода по известным $M_{ш}$ и R ;
3. Оценочно подобрать R и требуемый ход привода по известному $M_{ш}$.

Программа итерационно с заданным шагом подбирает требуемые параметры и просчитывает все возможные нагрузки на всех углах отклонения с заданным шагом. Программа учитывает задаваемые кинематические, габаритные и силовые параметры самого привода и места его крепления к плечу навески. Это позволяет сделать вывод о пригодности использования привода в системе управления рулевой поверхностью.

Таким же образом были решены задачи расчёта приводов механизации крыла: интерцепторов и тормозных щитков. Задача расчёта тормозных щитков аналогично расчёту приводов рулевых поверхностей. Двухмерная развертка кинематики интерцептора представлена на рисунке 3.

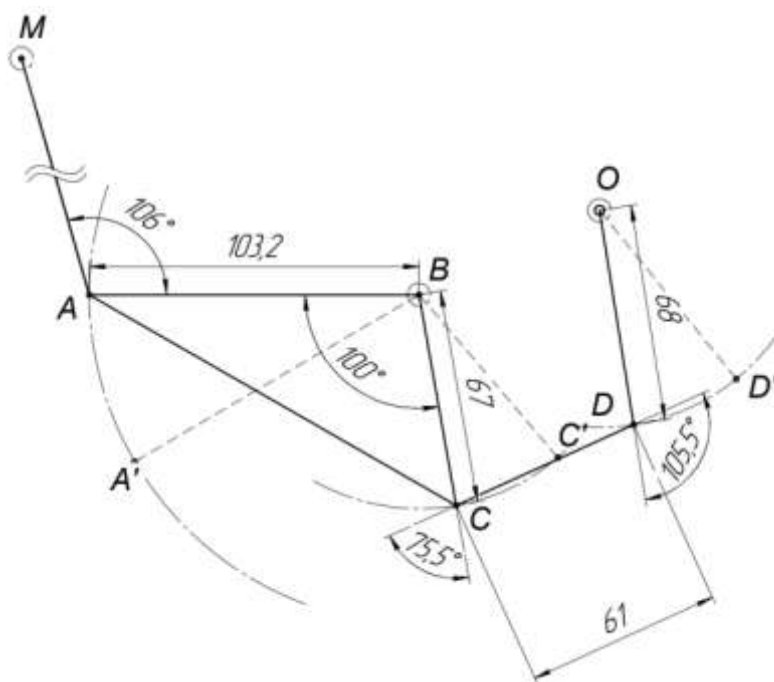


Рисунок 3 – задача расчёта привода тормозного щитка

В виду сложной трёхмерной геометрии с промежуточным звеном (треугольная качалка) в задаче расчёта привода интерцептора двухмерная задача была преобразована в трёхмерную задачу с использованием матриц направляющих косинусов для подвижных звеньев.

Методика расчёта механической проводки СУ

Аналогичным координатным методом была решена задача расчёта механической проводки штурвальной/информационной части СУ.

Рассматривается система из двух последовательно соединённых звеньев (например, рычаг и качалка), связанных тягой. При отклонении первого звена происходит изменение геометрии системы, что влияет на положение второго звена и эффективные плечи передачи усилий. Передаточное число можно определить тремя способами:

- линейная модель (по отношению плеч),
- нелинейная модель (по фактическим угловым перемещениям),
- линеаризованная модель с использованием функции арксинуса.

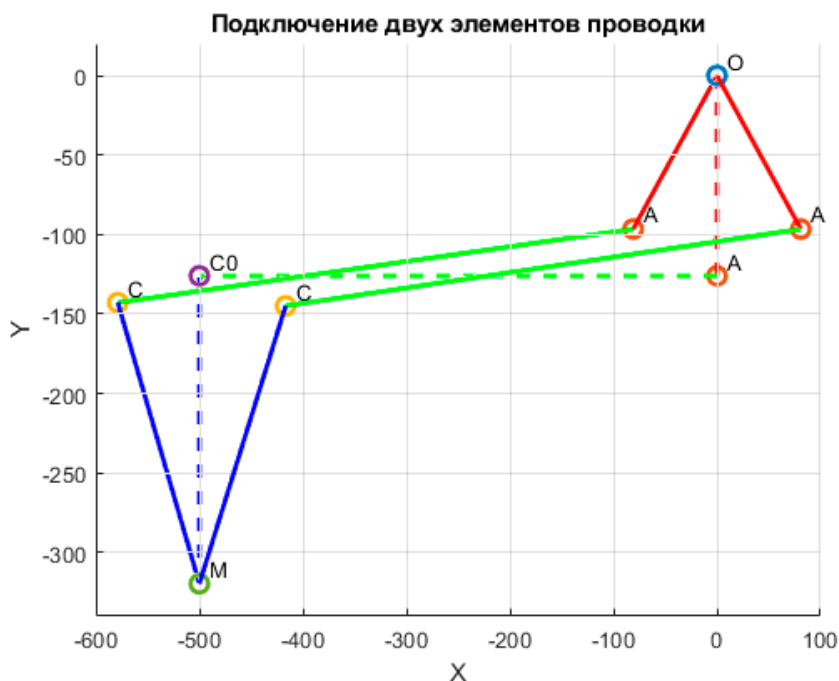


Рисунок 4 – задача расчёта механической проводки

При нулевых отклонениях все модели совпадают, однако при увеличении углов возникает существенное расхождение. Это связано с изменением эффективных плеч приложения сил: одно плечо увеличивается, другое уменьшается в зависимости от направления поворота. Нелинейность особенно заметна при углах более $15\text{--}20^\circ$. Также установлено, что конфигурация звеньев существенно влияет на характер нелинейности. В случае, когда звенья расположены по разные стороны от линии соединения, отклонения и изменения передаточных характеристик проявляются сильнее, чем при одностороннем расположении.

Алгоритм заключается в следующем: по известному углу поворота первого звена определяется новое положение точки соединения тяги, после чего вычисляется угол отклонения второго звена через векторное произведение. Этот подход позволяет корректно учитывать кинематические ограничения и исключать несуществующие конфигурации.

На основе этого алгоритма был создан универсальный запрограммированный блок в среде Simulink с задаваемыми входными параметрами: длины плеч, длина тяги, углы, определяющие взаимное положение звеньев. С помощью этого блока были спроектированы модели проводки штурвальной/информационной части СУ, в которых проведено моделирование движения выходного звена рулевой машины автопилота и воздействия на него моментов, создаваемых грузочными цилиндрами. Результаты показали, что максимальные моменты на валу исполнительного механизма в ряде случаев превышают номинальные значения, заданные

техническими характеристиками, и данное превышение возможно отследить только при использовании модели с учетом нелинейностей.

Заключение

Предложенный подход к расчёту приводов управления и механических проводок позволяет выявлять нелинейности, которые могут приводить к превышению допустимых нагрузок и, как следствие, к невозможности обеспечения требуемых характеристик работы приводов и рулевых машин.

Список литературы

1. Канатников А. Н., Крищенко А. П. Аналитическая геометрия: учеб. пособие для вузов. – 6-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 374 с. – (Математика в техническом университете; вып. 3).
2. Moir I., Seabridge A. G. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration. – 3rd ed. – Chichester: Wiley, 2008. – 544 с.
3. Васечкин Ю. С., Оболенский Ю. Г. Гидравлические приводы летательных аппаратов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 44 с.

УДК 004.896:629.3

МИХАЙЛОВ В.С., ЖИТКОВ Р.В., СВЯТОВ К.В.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ²

***Аннотация.** В статье представлена сводка результатов работ по созданию методов и средств проектирования специализированных высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) для роботизации логистики авиастроительного предприятия. Рассмотрены переоборудование серийных автомобилей, симуляция в Webots, подсистемы восприятия и планирования, а также модульная архитектура ROS 2. Показано, что такая САПР ускоряет разработку ВАТС для внутрицеховой и внешнецеховой перевозки деталей и перенос алгоритмов между симулятором и реальными платформами.*

² Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00265, <https://rscf.ru/project/23-11-00265/>.

Ключевые слова: *высокоавтоматизированное транспортное средство, САПР, ROS 2, Webots, робототехника, авиастроительное предприятие, межцеховая логистика.*

Введение

Роботизация внутрицеховой и внешнецеховой логистики является важным направлением цифровизации авиастроительного предприятия. Производство авиационной техники связано с перемещением деталей, оснастки и комплектующих между складами, участками обработки, сборочными цехами и контрольными постами.

В настоящее время ведутся работы по автоматизации линии перевозки запчастей между цехами. Для этого требуется не только беспилотный автомобиль, но и комплекс средств проектирования, моделирования и испытаний. Выполненные разработки рассматриваются как специализированная САПР ВАТС, поддерживающая выбор платформы, построение маршрута, обработку данных сенсоров и интеграцию с системой управления.

На базе лаборатории переоборудованы три платформы: ГАЗель NEXT с механической трансмиссией, УАЗ Патриот с автоматической коробкой передач и беспилотный электрический багги собственной разработки, включая конструкцию, силовую и управляющую электронику. Различие платформ подтвердило необходимость модульной среды проектирования.

Переоборудование платформ

Одним из базовых результатов стала подсистема исполнения команд ВАТС. Для УАЗ Патриот создан комплект переоборудования: привод рулевого управления, привод тормоза, механизм управления селектором КПП, главный блок, блок приводов и блок реле. Схема сохраняет штатное состояние автомобиля и возможность ручного перехвата управления [1].

Для логистики предприятия это важно: ВАТС должно безопасно работать на закрытой территории, взаимодействовать с персоналом и переходить в ручной или дистанционный режим. В проектные данные включаются 3D-модели креплений, схемы плат, параметры приводов, интерфейсы обмена и характеристики реакции исполнительных механизмов.

При переносе решений на ГАЗель NEXT потребовалось управление сцеплением и переключением передач. Электрический багги позволил заложить автоматизацию на уровне платформы. Поэтому универсальность САПР обеспечивается единым описанием функций: руление, разгон, торможение, сигнализация, телеметрия и аварийная остановка.

На фотографиях ниже, изображения ВАТС на базе Газель Next и электрический багги:



Рисунок 1 – ВАТС на базе Газель Next (слева) и электрического багги (справа)

Симуляция и траектории

Для ускорения разработки применяется симулятор ВАТС. На ранних этапах реальные испытания требуют площадки, оператора и несут риск повреждения оборудования. Симулятор позволяет задавать параметры транспортного средства, строить маршрут, визуализировать движение и сохранять метрики.

Дополнительно используется Webots - среда для отладки алгоритмов управления, восприятия и планирования без обязательного выезда реального автомобиля [2]. Виртуальная модель межцехового маршрута может включать дороги между корпусами, ворота, повороты ограниченного радиуса, пешеходные зоны, препятствия и точки погрузки. Проверенный в Webots ROS 2-модуль затем переносится на реальное ВАТС.

В симуляторе реализовано построение траекторий по опорным точкам. Рассматривались кривые Безье, Дубинса и Ридса-Шеппа. Для автомобильных платформ важен учет минимального радиуса поворота; кривые Ридса-Шеппа также учитывают движение задним ходом [3].

Логистический маршрут задается как последовательность контрольных точек: склад, проезд, зона ожидания, вход в цех, место передачи тары или запчастей. Траектория уточняется с учетом ограничений шасси, после чего в симуляторе проверяются следование, объезд препятствий и остановка у контрольной точки.

На рисунке ниже изображение из симулятора Webots:



Рисунок 2 – Симулятор Webots

Профили движения

Профиль движения задает правила выбора скорости и управляющих воздействий при следовании по маршруту. Для разных задач требуются разные профили: минимизация времени, экономичность, плавность движения или ограничение отклонения от траектории.

Классическое построение профиля требует точной модели автомобиля и решения оптимизационной задачи, что плохо масштабируется на разные шасси. В работе применен Q-learning, позволяющий формировать управляющую стратегию во взаимодействии с модельной средой [4]. В симуляторе получены профили быстрого и экономичного движения.

Для перевозки запчастей профиль должен учитывать безопасность груза, плавное торможение, ограничения вблизи персонала и точность подъезда к месту погрузки. Поэтому профиль движения становится проектным объектом: его можно обучать, сравнивать, хранить и адаптировать под конкретную платформу.

Архитектура ROS 2

Новой частью САПР является использование ROS 2 как основы программной архитектуры. Система строится как набор независимых нод, обменивающихся данными через топики, сервисы и параметры. Такой подход заменяет монолитное ядро распределенной архитектурой [5].

Поток данных организован последовательно. GPS или Webots передают координаты, лидар или Webots формируют облако точек, камера ZED или виртуальная камера публикуют изображения и карту глубины. Обработчики преобразуют данные в объекты глобальной карты, затем строится локальная карта препятствий OccupancyGrid. Воркеры рассчитывают варианты пути, а дерево поведений выбирает итоговое действие [5].

Модульность позволяет менять состав системы под задачу: включать лидар или камеру, выбирать обработчик карты препятствий, подключать A*, следование по разметке, обработку знаков или сложные маневры. Каждый участник команды отвечает за отдельный пакет с заданными входными и выходными топиками.

В проекте предусмотрены централизованная конфигурация через YAML-файлы и реестр топиков. Это фиксирует интерфейсы между модулями и ускоряет интеграцию. Нагрузочные испытания на данных, сопоставимых с облаком точек лидара, показали задержку менее 30 мс.

Восприятие и решения

Для работы ВАТС на территории предприятия важно восприятие окружающей среды. Сенсорная система включает лидар, стереокамеру ZED и ГНСС-приемник с RTK-поправками, а также локализацию на основе UWB. Лидар дает облако точек, камера используется для распознавания объектов, разметки, знаков и светофоров, а ГНСС задает положение транспортного средства.

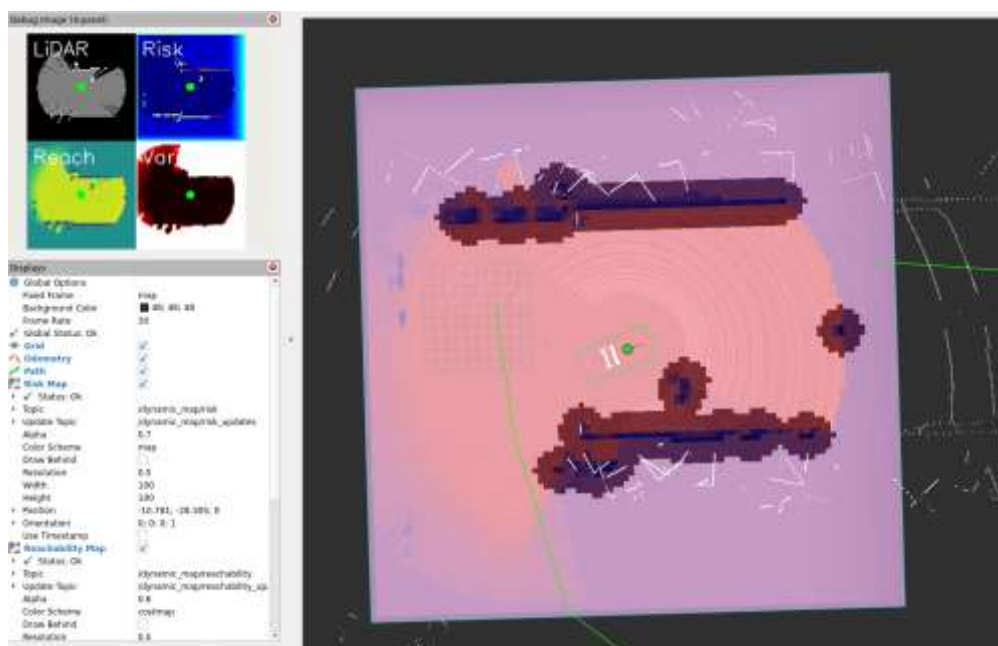


Рисунок 3 – Визуализация карты препятствий

Ключевое архитектурное решение – единый выходной формат обработчиков. Независимо от источника данные публикуются как объекты глобальной карты с геометрическим контуром и параметрами. Так одинаково описываются препятствие, пешеход, разметка, знак или граница зоны движения [6].

Главный блок принятия решений представлен воркерами и деревом поведений. Воркеры строят путь по карте, выполняют объезд препятствий алгоритмом A*, следуют по разметке и учитывают знаки. Дерево

поведений выбирает действие: движение, перестроение, объезд, снижение скорости или остановка.

На рисунке 3 изображение визуализации средства построения карты препятствий.

Результаты и перспективы

В результате сформирован комплекс методов и средств проектирования ВАТС, охватывающий механическую, электронную и программную части. Проверка проведена на ГАЗель NEXT с МКПП, УАЗ Патриот с АКПП и собственном электрическом багги. Решения показали переносимость архитектурных принципов между платформами.

Для роботизации логистики авиастроительного предприятия комплекс применим к линии перевозки запчастей между цехами. САПР позволяет описывать маршрут, подбирать платформу, проверять габаритные ограничения, отлаживать алгоритмы в Webots, подключать сенсоры и постепенно переносить функции на реальный автомобиль. Уровень автоматизации может соотноситься с классификацией SAE [7].

Заключение

Представленные методы и средства образуют основу специализированной САПР для ВАТС, применимых во внутрицеховой и внешнецеховой логистике авиастроительного предприятия. Подход объединяет переоборудование серийных автомобилей, собственную платформу, моделирование в Webots, генерацию траекторий, профили движения и архитектуру ROS 2. Использование симуляции, реестра топиков и единого формата данных сокращает путь от идеи к испытаниям на реальном ВАТС.

Список литературы

1. Рубцов И.А., Житков Р.В., Михайлов В.С., Святков К.В. Модели и средства проектирования подсистемы исполнения команд высокоавтоматизированного транспортного средства // Системы автоматизации проектирования. 2024. № 1. С. 89-96.
2. Cyberbotics Ltd. Webots: Open Source Robot Simulator. URL: <https://cyberbotics.com> (дата обращения: 10.05.2026).
3. Reeds J., Shepp L. Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards // Pacific Journal of Mathematics. 1990. Vol. 145, № 2. P. 367-393.
4. Zhitkov R., Mikhailov V., Rubtsov I. Methods and Software Tools for Generating Waypoint-Driven Motion Profiles for Highly Automated Vehicles Using Q-Learning // International Russian Smart Industry Conference. 2024.
5. Macenski S. et al. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild // Science Robotics. 2022. Vol. 7, № 66. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074.
6. Sviatov K. et al. Functional Model of a Self-Driving Car Control System // Technologies. 2021. Vol. 9. P. 100. DOI: 10.3390/technologies9040100.
7. SAE Levels of Driving Automation. URL: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update> (дата обращения: 10.05.2026).

УДК 629.7:338.45

МАКАРОВА М. Ю., МУСТАФИНА Г. Г.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОММЕРЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

***Аннотация.** В данной статье рассматривается потенциал внедрения беспилотных технологий в коммерции. Компании всё чаще используют новые решения, чтобы повысить эффективность своей деятельности и сократить издержки. Особенность беспилотных технологий заключается в том, что они могут выполнять задачи без постоянного участия человека, ведь их использование позволяет ускорять рабочие процессы, снижать затраты и улучшать качество услуг.*

***Ключевые слова:** Беспилотные технологии, предприятия, коммерция, беспилотные системы, процессы, экономика, логистика, мониторинг.*

Беспилотные технологии – это системы, способные работать в автоматическом режиме. Они могут регулироваться как на дистанции, так и функционировать автономно с помощью определенных программ и алгоритмов.

Раньше роботизированные технологии использовались в военной сфере, но со временем начали активно внедряться в общественную жизнь. Цифровая трансформация и сокращение стоимости сервисов обеспечили данную возможность. [3].

Современные беспилотные системы включают в себя такие ключевые элементы как: навигационные системы, датчики и сенсоры, камеры, программное обеспечение для обработки данных

Благодаря данным возможностям они могут выполнять различные задачи – от наблюдения за объектами до доставки товаров [4].

Беспилотные технологии применяются в различных сферах экономики, что делает их важным инструментом развития бизнеса [1].

В настоящее время беспилотные технологии активно используются в коммерческой деятельности. Логистика является одной из самых перспективных сфер. Использование дронов и автономного транспорта дает возможность существенно уменьшить время доставки и транспортные расходы. Особенно важно для интернет-торговли, где скорость играет важную роль [1].

В сельском хозяйстве автономные технологии используются для наблюдения за состоянием полей, анализа почвы и внесения удобрений, что помогает повысить эффективность производства. В строительной сфере беспилотные аппараты применяются для контроля за процессом работ и

проведения проверок. В промышленности такие технологии используются для диагностики оборудования, что позволяет вовремя выявлять неисправности. В энергетической отрасли беспилотные системы применяются для осмотра линий электропередач и других объектов инфраструктуры. Рынок беспилотных аппаратов активно прогрессирует и имеет огромный потенциал роста [2]. Внедрение таких технологий способствует автоматизации бизнес-процессов и улучшению управления [1].

Международная практика показывает, что большое количество стран ориентированы на создание равновесия между развитием технологий и поддержанием безопасности.

В Соединенных Штатах Америки работает система регулирования, которая основана на необходимой регистрации беспилотников, лицензировании операторов, установлении барьеров по зонам полётов.

Характерной чертой является направленность на поддержку бизнеса и новации.

В России развитие беспилотных систем является одним из главных направлений государственной политики. В стране используется всесторонний подход к управлению, который включает в себя нормы международных договоров и подзаконных актов [5].

Основными особенностями являются: необходимость регистрации беспилотников, получение согласий на полёты, барьеры вблизи стратегических объектов, развитие испытательных правовых режимов.

Использование беспилотных технологий даёт бизнесу сильные стороны. Во-первых, снижаются затраты, так как автоматизация процессов позволяет сократить расходы на оплату труда и использование техники [2]. Во-вторых, повышается эффективность работы, ведь беспилотные системы способны выполнять задачи намного быстрее, чем человек, что эффективно влияет на производительность [1].

В-третьих, повышается уровень безопасности, так как использование технологий дает возможность сократить участие человека в опасных условиях и уменьшает риск аварий и травм [3].

Внедрение помогает повысить конкурентоспособность компаний и улучшает экономические показатели.

Одной из главных проблем развития беспилотных технологий является недостаточная разработанность законодательства. В настоящее время не во всех странах существуют чёткие правила использования беспилотных устройств, что затрудняет их внедрение [2]. Устройства имеют лимитированное время самостоятельной работы и зависят от погодных условий. Ещё одной важной проблемой является безопасность, так как беспилотные системы могут быть объектом кибератак или давать сбои, которые приводят к авариям.

Внедрение роботизированных технологий вызывает социальные опасения. Некоторые люди считают, что автоматизация может вызвать сокращение рабочих мест и рост безработицы [1].

Перспективы развития беспилотных технологий являются значительными для общества. В будущем времени их использование будет только увеличиваться из-за развития технологий и роста спроса в предпринимательской деятельности [2].

Одним из важных направлений является объединение с искусственным интеллектом, что позволит увеличить уровень самостоятельности систем и расширить их возможности [4]. Беспилотные технологии будут активно использоваться в транспорте, торговле, логистике и сфере услуг. Развитие тенденций может привести к возникновению новых бизнес-моделей и изменению строения рынка. По прогнозам, беспилотные технологии способны стать важной частью цифровой экономики.

Таким образом, беспилотные технологии играют важную роль в современной коммерческой деятельности. Они помогают повысить эффективность работы и уменьшить затраты.

Несмотря на нынешние проблемы, такие как недостаточное регулирование и технические барьеры, совершенствование данной сферы не прекращается. Подводя итог, можно сказать, что в будущем беспилотные технологии будут использоваться намного активнее и окажут существенное влияние на развитие бизнеса и экономики.

Список литературы

1. Демьянов Д. С., Миргородская М. Г. Состояние и перспективы развития беспилотных технологий в коммерческой деятельности // Экономика строительства. – 2023. №9. С.8891. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54669417>
2. Кузина Е. Ю. Перспективы развития российского рынка беспилотных аппаратов // Российский внешнеэкономический вестник. – 2024. – № 10. С. 96-108. DOI:10.24412/2072804220241096108. <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-rossiyskogo-rynka-bespilotnyh-apparatov>
3. Просвирина Н. В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. – 2021. – № 10. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-perspektivy-razvitiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov>
4. Хакбердиев Ж. Б. Беспилотные летательные аппараты как эпоха развития авиационных и цифровых технологий // Вестник науки. – 2026. – Т.4, №2(95). – С.497 – 502. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88970581>
5. Киселев А. А., Сазонов А. И. Экономический и конкурентный потенциал комплексного использования беспилотных летательных аппаратов и искусственного интеллекта в российской экономике // Прогрессивная экономика. – 2026. – № 2. – С. 130 – 146. – DOI: 10.54861/27131211_2026_2_130. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89149160>

УДК 338.45:629.7:004.9

РЕДЖЕПОВ К.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А. Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВИАСТРОЕНИИ

Аннотация. В статье рассматривается цифровизация производственных процессов в авиастроении как фактор роста экономической эффективности. Показано, что результат цифрового проекта следует оценивать через снижение потерь, себестоимости, длительности цикла и управленческих рисков. Предложен прикладной подход к оценке цифровизации.

Ключевые слова: Авиастроение, цифровизация, экономическая эффективность, производственные потери, себестоимость, MES, PLM, цифровой двойник.

Авиастроение относится к капиталоемким и технологически сложным отраслям. Предприятия работают с длительным циклом, высокой стоимостью подготовки производства и жесткими требованиями к качеству. Поэтому цифровизация должна рассматриваться как инструмент снижения затрат и повышения управляемости ресурсов.

Актуальность связана с технологической самостоятельностью, модернизацией производственной базы и устойчивостью авиационных предприятий [1]. Цифровая трансформация промышленности опирается на управление данными, цифровые модели и промышленную аналитику [2].

Цель статьи – обосновать подход к экономической оценке цифровизации производственных процессов в авиастроении. Объект – производственные процессы предприятия; предмет – экономические результаты внедрения цифровых инструментов. Методы: сравнительный анализ и технико-экономическое обоснование.

Оценка цифровизации начинается с выявления производственной проблемы. Если MES, PLM, ERP-модули, цифровой двойник или аналитика не связаны с изменением затрат, сроков, качества либо загрузки ресурсов, проект становится формальным.

Таблица 1 – Производственные потери и цифровые решения

Вид потерь	Проявление	Инструмент	Результат
Время	Согласования	MES / PLM	Сокращение цикла
Качество	Переделки	Цифровой двойник	Меньше дефектов

Вид потерь	Проявление	Инструмент	Результат
Запасы	НЗП	ERP / MRP	Меньше запасов
Загрузка	Простои	Мониторинг	Рост мощностей
Данные	Ошибки передачи	Единая среда	Точность управления

Таблица 1 показывает, что экономический эффект возникает при прямой связи между потерей и цифровым инструментом. Так, цифровой двойник оправдан при значительных издержках позднего выявления несоответствий; в иных случаях больший результат может дать интеграция данных и диспетчеризация операций.

Для снижения риска формального внедрения целесообразна поэтапная модель обоснования: от диагностики потерь до контроля фактических результатов и решения о масштабировании.

Таблица 2 – Этапы экономического обоснования цифровизации

Этап	Содержание	Фокус	Результат
Диагностика	Поиск потерь	Время, качество	Карта проблем
Выбор решения	Сравнение инструментов	Затраты и эффект	Выбор технологии
Пилот	Проверка на участке	Факт показателей	Решение о доработке
Масштабирование	Расширение проекта	Совокупный эффект	План внедрения
Контроль	План / факт	Окупаемость	Управленческий отчет

Практическая ценность модели состоит в том, что она не подменяет экономический анализ описанием функций системы. В авиастроении важны не только визуализация, мониторинг и обмен данными, но прежде всего изменение параметров деятельности предприятия: цикла, дефектов, запасов и трудоемкости управления.

Особое значение имеет выбор контрольных показателей, поскольку эффект цифровизации распределяется между производством, качеством, запасами, инженерной подготовкой и управлением данными.

Таблица 3 – Показатели эффективности цифровизации

Время	Цикл, простои	Снижение потерь	Загрузка
Качество	Дефекты	Меньше затрат	Контроль

Время	Цикл, простои	Снижение потерь	Загрузка
Ресурсы	Запасы, НЗП	Капитал	Оптимизация
Данные	Актуальность	Меньше ошибок	Интеграция
Финансы	Себестоимость	Итог проекта	Масштабирование

Система показателей позволяет избежать оценки цифровизации только через прямую экономию затрат. В авиастроении часть эффекта проявляется косвенно: через сокращение цикла, снижение переделок, повышение достоверности данных и улучшение координации подразделений.

Цифровой двойник является важным инструментом авиационной промышленности, так как связывает расчетные, конструкторские, технологические и эксплуатационные данные. Согласно ГОСТ, он выступает цифровым представлением изделия или процесса [3]. Его экономический эффект возникает при использовании в управлении отклонениями, предупреждении дефектов и сокращении испытательных итераций [5].

Экономическое обоснование должно учитывать риски: низкое качество исходных данных, слабую интеграцию систем, сопротивление персонала, несоответствие инструмента реальной проблеме и завышенные ожидания от пилотного проекта.

Практическая значимость подхода состоит в его применимости при подготовке технико-экономического обоснования цифровых проектов, сравнении альтернативных решений, выборе контрольных показателей и подготовке управленческого отчета.

Таким образом, цифровизация производственных процессов в авиастроении должна рассматриваться как инструмент экономической эффективности. Обоснованным является проект, связанный с конкретной потерей, измеримыми показателями результата и системой управленческого контроля.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25.06.2022 № 1693-р «Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года». – Режим доступа: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206270017>.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.11.2021 № 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности». – Режим доступа: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202111090012>.
3. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 16 с.

4. Индикаторы цифровой экономики: 2024: статистический сборник / НИУ ВШЭ. – М.: НИУ ВШЭ, 2024. – 276 с.

5. Кузнецова С. В., Семенов А. С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. – 2023. – № 131. – DOI: 10.34759/trd-2023-131-24.

6. Тихонов А. И., Новиков С. В., Тихонова С. В. Проведение экономической оценки эффективности деятельности предприятий авиационной промышленности // Московский экономический журнал. – 2019. – № 12. – С. 784–793.

УДК 62-229.88

СОКОЛ И.Н., ЛЕВШОНКОВ Н.В.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЗАХВАТА КОНТЕЙНЕРА-ТЕЛЕЖКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СБОРА ОТХОДОВ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

***Аннотация.** В статье исследуется возможность оптимизации схемы нагружения захвата подъемно-переворотного устройства для опорожнения тележки, аккумулирующей отходы производства механической обработки (стружка, обрезь), в контейнер пакетировочного прессы или кузов транспортного средства. Эскизная модель разработана с учетом наиболее эффективного приложения нагрузки к тележке.*

***Ключевые слова:** механообрабатывающее производство, прочность конструкции*

В настоящее время одним из основных факторов, ограничивающих производительность авиастроительного предприятия, является производительность механообрабатывающих цехов. Автоматизация внутрицеховой логистики, как один из этапов комплексной автоматизации производственного участка, способна снизить трудозатраты на выполнение операций по загрузке заготовок, транспортировке готовых изделий и удалению отходов.

Как правило, для сбора отходов, таких как стружка, обрезь и смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ), с каждого станка на большинстве предприятий используются тележки, представляющие собой сварной контейнер из листового металла с присоединенными колесами и рукояткой для перемещения. Смазывающе-охлаждающая жидкость удаляется из объема тележки при помощи крана, приваренного к стенке корпуса. Твердые отходы из тележек затем перемещают в контейнеры, брикетирующие прессы или грузовые транспортные средства. Для этого, как правило, необходимо поднять тележку выше верхнего уровня

контейнера, наклонить, дожидаться полной эвакуации содержимого и вернуть тележку на уровень пола.

В различных случаях для автоматизации или роботизации данного процесса целесообразным является применение различных вспомогательных устройств. Если приемный контейнер находится не выше уровня пола, применяют эстакады с проемами для опорожнения тележки. В случае, если загрузочный уровень контейнера находится высоко, предпочтительным является применение специализированного подъемного устройства. При проектировании конструкции захватывающих и подъемных устройств не следует недооценивать выбор оптимальной схемы приложения нагрузок к тележке. Грамотно выбранная схема захвата не только обеспечивает долгий срок службы тележки, но и освобождает привод устройства от дополнительной нагрузки, связанной с избыточной массой конструкции захвата.

В общем случае тележка представляет собой контейнер формы параллелепипеда с отклоненной и усеченной передней гранью. Как правило, целесообразной схемой для подъема и переворота подобных контейнеров является подъем и переворот относительно оси, принадлежащей самому контейнеру или его рукоятке. Подобная схема наиболее широко используется для подъема и переворота контейнеров с бытовыми отходами, когда контейнер поднимается за приваренные к нему фитинги и переворачивается относительно их оси [1, с 61]. Данный принцип выгоден и для рассматриваемой тележки.

Силовая схема при подъеме тележки вышеописанным способом представлена на рисунке 1. Тележка загружена распределенной нагрузкой q от содержимого и шарнирно подвешена на цилиндрической рукоятке (опора A). Момент, создаваемый нагрузкой q относительно оси рукоятки, компенсируется реакцией опоры B.

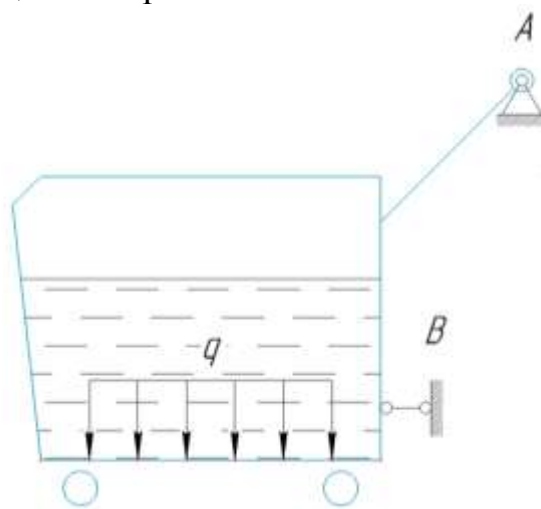


Рисунок 1 – Схема нагружения подвешенной тележки

Для определения напряжений в материале при данном случае нагружения произведен расчет методом конечных элементов. При

построении трехмерной модели тележки толщина стенки была задана равной 3 мм. При этом было принято допущение, что брусья приварены к задней стенке вровень с боковыми стенками.

Для валидации результатов конечно-элементного моделирования было подготовлено две модели: объемная с трехмерной сеткой (рис. 2, а) и поверхностная (рис. 2, б). Модели загружены гидростатической нагрузкой, имитирующей нахождение в тележке 115 кг стружки насыпной плотностью 1200 кг/м^3 . Перемещения нижней части задней стенки ограничены закреплением по нормали.

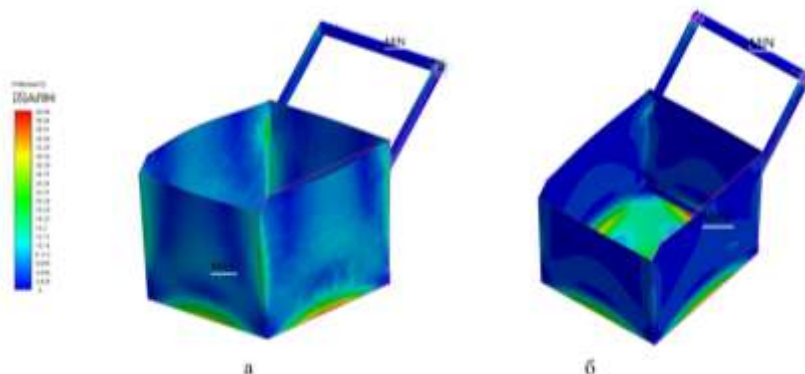


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных напряжений в модели (эквивалентные напряжения)

На обеих моделях наблюдается практически одинаковая картина распределения напряжений и деформаций. Как видно из рисунка 2, наибольшие напряжения сконцентрированы на ребре, соединяющем заднюю стенку и дно тележки, и в области сварных швов, соединяющих брусья и корпус тележки, а наибольшие деформации – в центре дна тележки (рисунок 3).

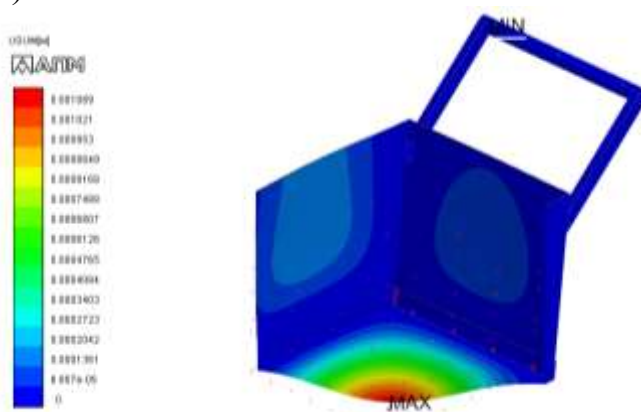


Рисунок 3 – деформации модели под нагрузкой

На следующем этапе расчета брусья были перемещены на 50 мм к центру по оси рукоятки, что отражает наиболее распространенную конструкцию тележки (брусья приварены к задней стенке). Как видно из рисунка 4, смещение области соединения бруса и корпуса от ребра

приводит к трехкратному увеличению напряжений в области сварного шва.

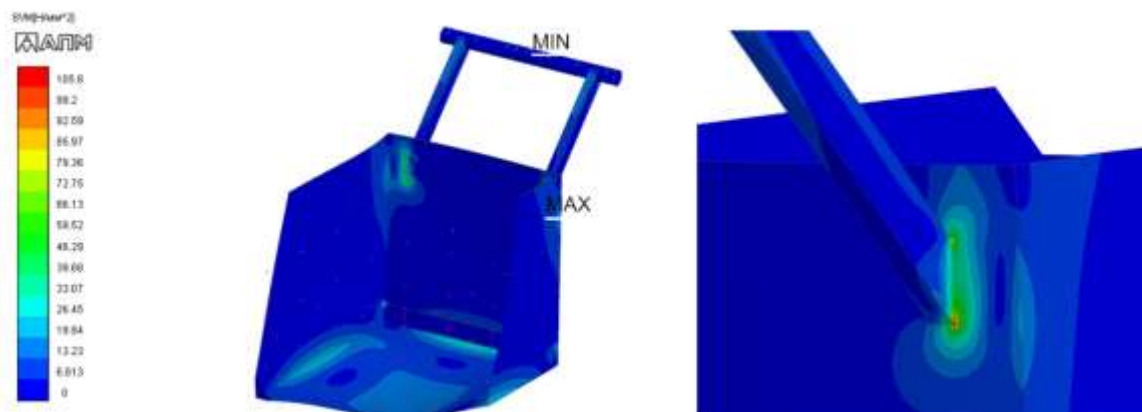


Рисунок 4 – распределение напряжений в конструкции с брусками, приваренными к задней стенке тележки

Наиболее очевидным решением проблемы является введение опоры С под дном тележки (рис. 5, а). Однако при таком расположении опоры к ней будет приложена большая нагрузка на длинном плече $f_A(R_C)$ – следовательно, для компенсации возникающего изгибающего момента требуется значительное усиление конструкции захвата подкосом. Помимо прочего, напряжения в материале дна тележки не превышают 24 МПа и ввиду малой толщины пластины являются растягивающими (мембранными) усилиями, в то время как сварное соединение в конструкции воспринимает срезающую нагрузку высокой интенсивности.

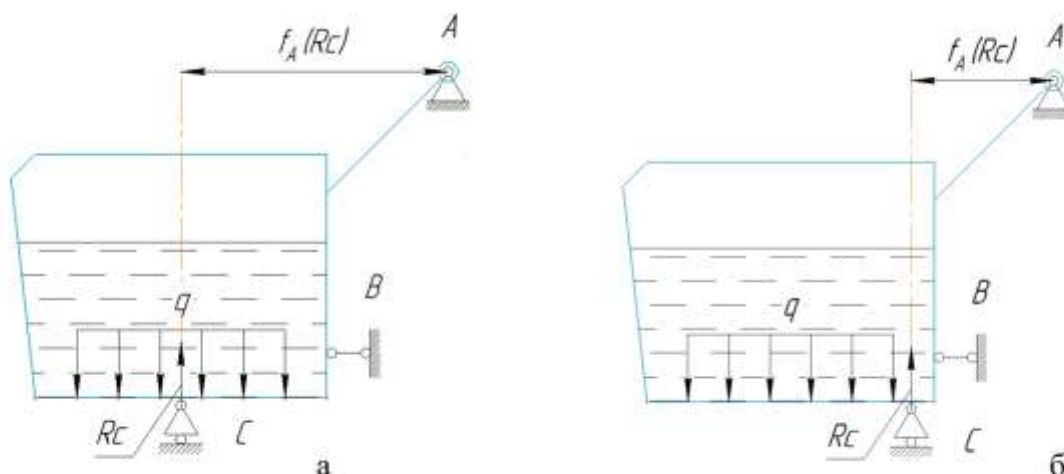


Рисунок 5 - Оптимизированная силовая схема

Более оптимальным решением станет расположение опоры С под ребром, соединяющим заднюю стенку и дно тележки. (рис. 5, б) Это сократит плечо $f_A(R_C)$ момента реакции опоры относительно рукоятки

тележки и позволит облегчить конструкцию захватывающего устройства. В то же время, реакция опоры С полностью компенсирует перерезывающую силу на сварном шве.

Картина распределения напряжений с учетом введения дополнительной опоры С показана на рисунке 6.

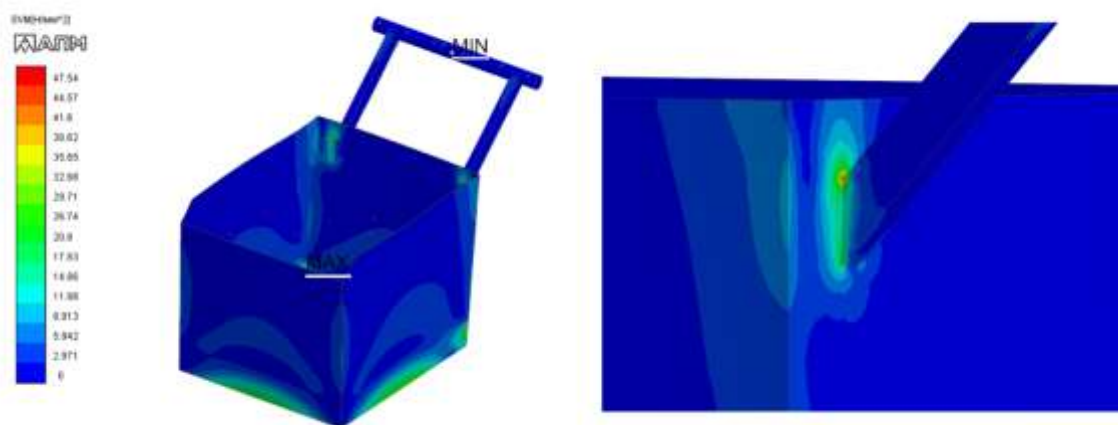


Рисунок 6 – Распределение напряжений после введения дополнительной опоры

Предложенная схема нагружения может быть использована в конструкции подъемных устройств, захватывающий механизм которых не будет создавать существенной дополнительной нагрузки на приводные узлы подъемного устройства.

Все расчеты выполнены при помощи системы прочностного конечно-элементного экспресс-анализа «АРМ FEM», являющейся приложением САПР «КОМПАС-3D v24 Учебная версия», предназначенной для использования студентами ВУЗов для выполнения индивидуальных работ.

Список литературы

1. Машины для сбора и вывоза твёрдых бытовых отходов. Устройство, основы расчёта: учеб. пособие / В.И. Баловнев, Г.В. Кустарёв, Р.Г. Данилов, Н.М. Андрюхов; под общ. ред. В.И. Баловнева и Г.В. Кустарёва. – М.: МАДИ, 2022. – 164 с.

УДК 621.7

ФОКИН И.В., ГОВОРКОВ А.С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
3D-МОДЕЛЕЙ И ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
НАСЛЕДСТВЕННОСТИ**

Аннотация. Статья посвящена автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) на основе семантического анализа электронных моделей изделий (STEP AP242). Предложен детерминированный графо-эвристический алгоритм, который, в отличие от нейросетевых подходов, обеспечивает полную интерпретируемость решений при синтезе технологических маршрутов. Главной особенностью методики является использование математической модели многокритериальной оптимизации, учитывающей технологическую наследственность (накопление погрешностей) через матрицу взаимного влияния операций. Тестирование алгоритма на 50 промышленных деталях подтвердило высокую точность распознавания конструктивно-технологических элементов (97,9%) и совпадение сгенерированных маршрутов с эталонными в 92% случаев. Валидация модели погрешностей на реальном производстве показала ошибку прогнозирования всего 4%. Программная реализация предложенного алгоритма позволяет сократить трудоемкость разработки технологических процессов на 46%.

Ключевые слова. цифровизация машиностроения, технологическая подготовка производства, технологическая наследственность.

Методология исследования

Разработанная методика автоматизированного проектирования технологических маршрутов базируется на детерминированном гибридном подходе. В отличие от генеративных нейросетевых моделей (Generative AI), требующих объемных обучающих выборок и не гарантирующих строгого соблюдения допусков [5], предложенный алгоритм опирается на теорию графов и экспертные правила. Это обеспечивает 100% интерпретируемость каждого назначенного перехода.

Процесс синтеза маршрута разделен на три последовательных этапа: извлечение семантики, распознавание элементов и оптимизация последовательности операций.

Извлечение семантики и построение графовой модели

На первом этапе на вход программного модуля (написанного на языке Python с использованием библиотек OpenCASCADE и NetworkX) поступает электронная модель изделия (ЭМИ) в нейтральном формате обмена данными STEP AP242 (ISO 10303-242). Формат STEP позволяет извлекать не только граничное представление геометрии (B-Rep), но и аннотации PMI (Product Manufacturing Information) – допуски размеров, формы, расположения и параметры шероховатости.

Математически электронная модель преобразуется в информационно-логическую модель (ИЛМ) в виде взвешенного ориентированного графа технологических связей

$$G_{tech} = (V_{el}, E_{link}, W), \quad (1)$$

где:

- Vel – множество элементарных поверхностей или конструктивно-технологических элементов (КТЭ);
- E_{link} – множество ориентированных связей (например, принадлежность к одной размерной цепи или технологическое базирование);
- W – весовая функция связей, учитывающая геометрическую близость и допуски.

Каждому узлу графа (КТЭ) v_i ставится в соответствие вектор извлеченных атрибутов: тип элемента, геометрические параметры (диаметр, длина), качество точности (IT_i), шероховатость (Ra_i) и статус технологической базы.

Распознавание конструктивно-технологических элементов

Для идентификации сложных КТЭ (таких как «глухое резьбовое отверстие», «отбортовка», «рифтовая зона») применяется метод поиска изоморфных подграфов. Алгоритм сопоставляет выделенные топологические структуры с эталонными шаблонами из базы технологических знаний. Программная реализация парсинга атрибутов STEP-файла выполнена с применением аппарата регулярных выражений (модуль «ге»), что исключает ложные срабатывания классификатора.

После распознавания для каждого элемента v_i алгоритм формирует ранжированный список допустимых методов обработки m_k , вычисляя многокритериальную интегральную оценку применимости $Score(A_i, m_k)$, учитывающую геометрическую совместимость, обеспечение точности, производительность и экономичность операции. Результатом данного шага является набор черновых, получистовых и чистовых цепочек переходов $Chain_i$ для каждой поверхности отдельно.

Математическая модель оптимизации глобального маршрута

Ключевой научной задачей является синтез оптимальной последовательности $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$ выполнения всех N операций для всей детали в целом. Выбор порядка переходов не является нейтральным, так как он определяет структуру размерных цепей и накопление технологической наследственности (остаточных деформаций и погрешностей базирования) [6].

Для решения задачи многокритериальной оптимизации введена целевая функция $F(\pi)$, минимизирующая взвешенную сумму нормированного времени изготовления, себестоимости и интегральной погрешности:

$$F(\pi) = w_1 \cdot C_{time}(\pi) + w_2 \cdot C_{cost}(\pi) + w_3 \cdot C_{acc}(\pi) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где: w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты приоритетов производства.

Интегральный критерий точности $C_{acc}(\pi)$ вычисляется рекуррентно по мере добавления операций в маршрут. Для каждой поверхности

конечная погрешность $\varepsilon_i^{(t)}$ с учетом матрицы взаимного влияния α определяется по формуле:

$$\varepsilon_i^{(t)} = \varepsilon_i^{(t-1)} \cdot k_{corr} + \Delta\varepsilon_i(m_{\pi(t)}) + \sum_{j \neq i} \alpha_{ji} \cdot \varepsilon_j^{(t-1)}, \quad (3)$$

где:

- $\Delta\varepsilon_i(m)$ – собственная (внутренняя) погрешность выбранного метода обработки;
- α_{ji} – эмпирический коэффициент технологической наследственности, отражающий влияние ранее обработанной базовой поверхности j на точность текущей поверхности i ;
- k_{corr} – поправочный коэффициент.

Поиск оптимального решения осуществляется эвристическим алгоритмом направленного многовариантного перебора с итерационным улучшением (комбинирование маршрутов и локальные модификации), что позволяет находить субоптимальное решение за 10–30 секунд для деталей средней сложности (до 30 операций).

Результаты экспериментальных исследований

Для верификации разработанного программного комплекса и оценки адекватности предложенной математической модели был проведен систематический эксперимент на репрезентативной выборке из 50 электронных моделей промышленных деталей (типа «кронштейн», «стенка», «шпангоут», «профиль»). Детали включали элементы как механической обработки, так и листовой штамповки. Общее количество выделенных конструктивно-технологических элементов (КТЭ) в тестовой выборке составило 242 единицы.

Оценка точности извлечения семантики

Качество работы графо-эвристического модуля распознавания (парсинга файлов STEP AP242) оценивалось с помощью классических метрик: точности (Precision) и полноты (Recall). Анализ результатов классификации показал 235 истинно-положительных (TP), 5 ложно-положительных (FP) и 7 ложно-отрицательных (FN) срабатываний алгоритма.

Расчетные значения метрик составили:

$$\text{Точность распознавания: } Precision = \frac{TP}{TP+FP} = 97,9\%;$$

$$\text{Полнота распознавания: } Recall = \frac{TP}{TP+FN} = 97,1\%.$$

Анализ ошибок (ложных срабатываний) показал, что алгоритм испытывает затруднения преимущественно при наличии пересекающихся КТЭ на криволинейных поверхностях, где топология B-Rep графа становится неоднозначной. Тем не менее, общая точность автоматического синтеза технологических маршрутов оказалась высокой: в 46 случаях из 50

(92%) сгенерированная машиной последовательность операций полностью совпала с эталонными решениями главных технологов предприятия.

Валидация математической модели накопления погрешностей

Для подтверждения работоспособности целевой функции $F(\pi)$ и рекуррентной формулы расчета точности с учетом технологической наследственности (матрицы α) проведена верификация на реальной детали «Стенка» (листовой сплав 1163РДМ).

В качестве примера рассмотрен синтез маршрута для КТЭ «Отбортовка», которому предшествует операция «Фрезерование контура» (формирование технологической базы). Исходные параметры, заложенные в базу знаний системы:

Собственная погрешность фрезерования базовой поверхности:
 $\Delta\varepsilon_1 = 0,05$ мм;

Собственная (внутренняя) погрешность операции отбортовки:
 $\Delta\varepsilon_2 = 0,10$ мм;

Коэффициент технологической наследственности (влияние погрешности базы на последующую гибку): $\alpha_{12} = 0,35$.

Согласно предложенной математической модели, расчетная суммарная погрешность расположения отбортовки составила:

$$\varepsilon_{calc} = \Delta\varepsilon_2 + \alpha_{12} \cdot \Delta\varepsilon_1 = 0,10 + 0,35 \cdot 0,05 = 0,1175 \text{ мм.} \quad (4)$$

Разработанная методика автоматизированного синтеза технологических маршрутов на основе графовых моделей доказала свою научную и практическую состоятельность. Отказ от нейросетевого «черного ящика» в пользу детерминированных продукционных правил позволил добиться 100% интерпретируемости назначаемых операций. Экспериментальная проверка подтвердила высокую точность автоматизированного распознавания PMI-данных и конструктивных элементов из формата STEP AP242 ($Precision = 97,9\%$), а также совпадение сгенерированных маршрутов с эталонными решениями в 92% случаев. Валидация предложенной математической модели доказала, что явный учет матрицы технологической наследственности позволяет прогнозировать накопление погрешностей с ошибкой не более 4%. Практическое применение предложенного алгоритма автоматизирует рутинные процессы САПР-систем, сокращая трудоемкость технологической подготовки многономенклатурного производства почти в 2 раза при гарантированном обеспечении качества выпускаемых изделий.

Список литературы

1. Аверченков, В. И. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов: учебное пособие / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. – 2-е изд., стер. – Москва: ФЛИНТА, 2011. – 228 с.
2. ГОСТ Р 2.052-2021. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. – Введ. 2021-09-01. – Москва:

Российский институт стандартизации, 2021. – 24 с. (Примечание: это российский аналог ISO 16792 для PMI).

3. Wang, L. AI in manufacturing: a review / L. Wang, X. V. Wang // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 68. – P. 104-118.

4. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / П. И. Ящерицын, А. М. Дальский. – Минск: Наука и техника, 1990. – 285 с.

5. Бочкарев, П. Ю. Экспертные системы и машинное обучение в технологической подготовке производства: проблемы интерпретируемости решений / П. Ю. Бочкарев, А. В. Петров // СТИН. – 2021. – № 4. – С. 12-16.

6. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Б. М. Базров. – Москва: Машиностроение, 2005. – 736 с.

УДК 629.7.01:004.896

ХАЙРУЛЛИН И. Д.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СЕМАНТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МЕСТНОСТИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВАТС

***Аннотация.** В статье рассматривается задача обеспечения навигационной автономии высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) в условиях авиастроительного предприятия. Обоснована необходимость перехода от чисто геометрических к семантико-геометрическим моделям окружения для решения задач внутрицеховой и внешнецеховой логистики. Предложен алгоритм пространственно-семантической дискретизации ориентиров, направленный на предотвращение избыточности навигационных карт. Экспериментально показано, что внедрение типо-зависимых критериев инициализации объектов позволяет снизить кардинальность вектора состояния, выстраивая компактные модели местности, что в последующем может послужить основой в решении задач планирования траектории движения.*

***Ключевые слова:** высокоавтоматизированные транспортные средства, семантическое картографирование, планирование движения, авиастроительное предприятие, логистика, фильтрация дубликатов.*

Введение

Автоматизация производственных процессов на авиастроительных предприятиях предполагает применение высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) для решения задач внутрицеховой и внешнецеховой логистики [1]. Транспортировка крупногабаритных узлов между сборочными ангарами требует обеспечения навигационной

автономии мобильных платформ. Функционирование ВАТС на территории промышленных зон характеризуется деградацией сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) вследствие эффекта многолучевого распространения и перекрытия прямой видимости спутников металлическими конструкциями [2].

В условиях недоступности внешнего навигационного сигнала оценка состояния системы осуществляется бортовыми вычислителями на основе алгоритмов одновременной локализации и построения карты (SLAM) [3]. Для планирования движения в динамической среде предприятия использования исключительно геометрических признаков недостаточно; требуется формирование семантически аннотированных моделей окружения, позволяющих дифференцировать типы объектов (транспортные средства, элементы инфраструктуры, зоны проезда) [4].

Практическая реализация семантического картографирования сопряжена с проблемой контроля размерности модели окружения [5]. В условиях слабоструктурированной среды и накопления ошибок одометрии классические алгоритмы фильтрации склонны к генерации ложных дубликатов ориентиров при повторном наблюдении одних и тех же физических объектов [6]. Регистрация избыточного числа переменных в векторе состояния ведет к квадратичному росту вычислительной сложности алгоритмов оценивания, что затрудняет функционирование навигационного комплекса в масштабе времени, близком к реальному [7]. Таким образом, разработка методов пространственно-семантической дискретизации ориентиров является задачей, направленной на формирование компактных карт местности для последующего планирования траектории движения ВАТС.

Методы картографирования и алгоритм контроля плотности

Процесс формирования модели окружения базируется на рекурсивном оценивании состояния системы с использованием расширенного фильтра Калмана (ЕКФ). Состояние системы в момент времени t описывается вектором $\hat{X}_t$, объединяющим оценку позы ВАТС $\hat{x}_{v,t}$ и координаты N_t стационарных ориентиров $\hat{m}_j$:

$$\hat{X}_t = (\hat{x}_{v,t}, \hat{m}_1, \dots, \hat{m}_{N_t})^T \quad (1)$$

На вход алгоритма оценивания поступает множество типизированных наблюдений $Z_t = \{(\tilde{z}_i, c_i)\}_{i=1}^{N_{obs}}$, формируемое подсистемой нейросетевого восприятия. Каждый элемент множества представляет собой кортеж, включающий вектор геометрических измерений $\tilde{z}_i$ в локальной системе координат ВАТС и дискретный семантический идентификатор c_i , определяющий класс объекта (например, «дискретное препятствие» или «край проезжей части»).

При подтверждении гипотезы о регистрации нового стационарного объекта выполняется процедура расширения вектора состояния X_t и соответствующей ковариационной матрицы P_t . Глобальные координаты нового ориентира $\hat{m}_{N+1}$ определяются путем применения обратной модели наблюдения $h^{-1}(\cdot)$ к текущей оценке позы ВАТС $\hat{x}_{v,t}$ и вектору геометрических измерений $\tilde{z}_t$.

В классических реализациях EKF SLAM регистрация ориентиров базируется на статических пороговых критериях, не учитывающих семантическую интерпретацию сцены. При наблюдении линейно-протяженных структур или в условиях перцептивной неоднозначности это приводит к инициализации избыточного числа переменных. Для решения данной проблемы предложен алгоритм управления картой, включающий адаптивный критерий пространственного разнесения объектов одного класса.

С целью предотвращения информационной избыточности модели вводится ограничение на минимально допустимое евклидово расстояние δ_{c_t} между ориентирами идентичного семантического типа. Регистрация нового объекта в пространстве состояний разрешается при выполнении условия:

$$\min_{j | \text{type}(m_j) = c_t} \| h^{-1}(\hat{x}_{v,t}, \tilde{z}_t) - \hat{m}_j \|_2 > \delta_{c_t} \quad (2)$$

Значение порога δ_{c_t} является функционально зависимым от семантического класса c_t . Для дискретных ориентиров, характеризующихся высокой структурной жесткостью, значение порога устанавливается минимальным, что позволяет разделять близкорасположенные физические объекты. Для линейно-протяженных структур (границы дорожного полотна) значение порога увеличивается, обеспечивая пространственную дискретизацию контуров. Внедрение данного критерия выступает механизмом управления вычислительной сложностью $O(N^2)$, ограничивая рост размерности ковариационной матрицы P_t и повышая структурную детерминированность формируемой карты.

Экспериментальные результаты

Верификация предложенного алгоритма пространственно-семантической дискретизации проводилась методом имитационного моделирования. В качестве тестовой среды использовался виртуальный полигон, имитирующий участок промышленной зоны с асфальтированным покрытием и грунтовыми обочинами. Сценарий эксперимента предусматривал движение ВАТС по замкнутой траектории протяженностью около 150 м. Особенностью сцены являлась низкая плотность дискретных ориентиров (6 физических объектов), что

усложняло задачу локализации и способствовало накоплению ошибки одометрии на протяженных участках.

Для оценки алгоритма проводилось сопоставление результатов работы базовой реализации EKF SLAM (с унифицированными критериями инициализации) и предложенного метода с семантически-управляемым контролем плотности карты. Оценка качества картографирования выполнялась по показателю кардинальности вектора состояния.

Анализ полученных данных показывает различие в динамике формирования модели окружения. Вследствие накопленного дрейфа траектории при повторном наблюдении физического объекта базовым алгоритмом расчетное расстояние между новым измерением и существующим ориентиром превышало порог статистической валидации. Это приводило к инициализации новых переменных, в результате чего базовая конфигурация регистрировала в векторе состояния в среднем 78 объектов.

Применение предложенного алгоритма с типозависимыми порогами пространственной дискретизации позволило снизить интенсивность генерации дубликатов. Экспериментальная конфигурация сформировала разреженную модель окружения, включающую 33 объекта (данное число включает как дискретные препятствия, так и точки, аппроксимирующие границы проезжей части). Введение ограничений на минимальное расстояние между объектами одного класса ограничивало регистрацию близкорасположенных элементов.

Снижение кардинальности вектора состояния способствует ограничению вычислительной нагрузки на бортовой компьютер ВАС. Формирование компактной семантической карты уменьшает количество ложных препятствий в модели окружения, что является фактором, повышающим применимость полученных данных для алгоритмов планирования траектории движения в условиях логистики предприятия.

Заключение

В статье предложен подход к формированию семантико-геометрических моделей окружения для задач навигации высокоавтоматизированных транспортных средств в условиях авиастроительного предприятия. Разработан алгоритм пространственно-семантической дискретизации, обеспечивающий контроль плотности карты за счет введения типозависимых ограничений на инициализацию ориентиров. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что применение данного алгоритма позволяет снизить кардинальность вектора состояния и ограничить интенсивность генерации дубликатов объектов при накоплении ошибок одометрии. Полученные результаты формируют основу для создания компактных навигационных карт,

применимых для алгоритмов планирования траектории БАТС при выполнении логистических операций в слабоструктурированных средах.

Список литературы

1. Fragapane G. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda / G. Fragapane, R. De Koster, F. Sgarbossa, J. O. Strandhagen // European Journal of Operational Research. – 2021. – Vol. 294, No. 2. – P. 405–426.
2. Kuutti S. A survey of deep learning applications to autonomous vehicle control / S. Kuutti, R. Bowden, Y. Jin et al. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22, No. 2. – P. 712–733.
3. Cadena C. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age / C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo et al. // IEEE Transactions on Robotics. – 2016. – Vol. 32, No. 6. – P. 1309–1332.
4. Garg S. Semantics for Robotic Mapping, Perception and Interaction: A Survey / S. Garg, N. Sünderhauf, M. Milford // Foundations and Trends in Robotics. – 2020. – Vol. 8, No. 1-2. – P. 1–224.
5. Rosinol A. 3D Dynamic Scene Graphs: Actionable Spatial Perception with Places, Objects, and Humans / A. Rosinol, A. Gupta, M. Abate et al. // Robotics: Science and Systems XVI. – 2020.
6. Bailey T. Consistency of the EKF-SLAM Algorithm / T. Bailey, J. Nieto, E. Nebot // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2006. – P. 3562–3567.
7. Thrun S. Probabilistic Robotics / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox. – Cambridge: MIT Press, 2005. – 672 p.

УДК 004.7:629.7

БЕЛОУСОВ Д.Д.

МАИ, г. Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

***Аннотация.** В статье рассматривается архитектура индустриального интернета вещей применительно к предприятиям авиационной промышленности в контексте её соотношения с традиционными автоматизированными системами управления технологическими процессами, регулируемые ГОСТ Р 71765—2024. На основе анализа мирового и российского опыта внедрения идентифицированы особенности построения архитектуры индустриального интернета вещей на предприятиях авиационной промышленности, обусловленные повышенными требованиями к детерминированности и функциональному разделению операционно-технологического и информационно-технологического доменов.*

Ключевые слова: *индустриальный интернет вещей, автоматизированные системы управления производством, цифровизация производственных процессов.*

Введение

Прежде чем рассмотреть особенности построения архитектуры индустриального интернета вещей на предприятиях авиационной промышленности, необходимо разграничить три понятия, которые нередко смешиваются в информационном поле. Автоматизированная система управления предприятием (АСУП) возникла в советской инженерной традиции как система планово-учётного контура — она охватывает уровни ERP и MES и оперирует учётными данными и производственными заданиями. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) представляет собой организационно-техническую систему, непосредственно осуществляющую контроль и управление технологическим объектом в реальном времени (от датчиков и исполнительных механизмов полевого уровня до SCADA и автоматизированных рабочих мест операторов). Логика управления сосредоточена в программируемых логических контроллерах и остаётся автономной вне зависимости от вышестоящих систем. Термин индустриальный интернет вещей (IIoT, от англ. Industrial Internet of Things) сформировался под влиянием двух подходов — европейской концепции «Индустрия 4.0», сформулированной в Германии как программа четвёртой промышленной революции, и американской архитектурной инициативы IIC (Industrial Internet Consortium), разработавшей эталонную архитектуру IIRA [1]. Проще говоря IIoT представляет собой надстроечный аналитический слой для АСУ ТП, собирающий данные с операционно-технологического уровня предприятия через открытые протоколы и передающий их на уровень АСУП. Далее необходимо провести анализ нормативной базы, поскольку каждой из трёх технологий соответствует свой корпус государственных и международных стандартов.

Основополагающим документом для автоматизированных систем управления технологическими процессами в Российской Федерации является ГОСТ Р 71765—2024 «Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Общие требования» [2]. Согласно тексту стандарта, он устанавливает основные требования в области автоматизированных систем управления технологическими процессами, функционирующих на объектах производственно-технологических комплексов, и предназначен для применения при проектировании, разработке, реконструкции, техническом перевооружении и эксплуатации, начиная с физических датчиков и

исполняющих механизмов и заканчивая автоматизированными рабочими местами оператора-технолога и базами данных.

Стандарты, регулирующие сферу промышленного интернета вещей, строятся на принципиально иной методологической основе. Международный технический отчёт ISO/IEC TR 30166:2020, на положения которого опирается российская практика стандартизации в данной сфере, описывает общий ландшафт промышленного интернета вещей, охватывая характеристики, технические аспекты, а также функциональные и нефункциональные элементы структуры IoT-систем. Национальный стандарт ГОСТ Р 70924-2023 [3], идентичный международному стандарту ИСО/МЭК 30141:2018 и утверждённый приказом Росстандарта, устанавливает типовую эталонную архитектуру интернета вещей, определяя иерархически организованную модель взаимодействия полевых устройств с корпоративными приложениями. Стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 29161—2019, идентичный международному стандарту ИСО/МЭК 29161:2016 и внесённый техническими комитетами ТК 355 и ТК 194, устанавливает схему уникальной идентификации для интернета вещей, основанную на существующих и совершенствующихся структурах данных. Согласно тексту стандарта, в системе интернета вещей каждая «вещь» должна иметь идентификатор, указывающий, что она собой представляет, а различные формы уникальной идентификации должны быть объединены в одном сообщении в однозначном виде.

Как итог, стандарт ГОСТ Р 71765—2024 формирует нормативную основу, на которую вынуждены опираться любые надстроечные системы, включая IoT-системы, при проектировании узла сопряжения с операционно-технологическим уровнем предприятия. В свою очередь стандарты ГОСТ Р 70924-2023 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 29161—2019 принципиально важны как нормативное описание архитектуры надстройки. Они определяют, каким образом данные, поступающие с полевого уровня, должны быть идентифицированы, структурированы и маршрутизированы в направлении аналитических систем и систем принятия решений, не вмешиваясь при этом в управляющий контур, регламентированный ГОСТ Р 71765—2024.

Таким образом, два корпуса стандартов образуют комплементарную нормативную конструкцию, в которой стандарты АСУ ТП задают границы физической безопасности, а стандарты IoT задают архитектуру информационного слоя, надстраиваемого в этих границах. Понимание этой комплементарности является необходимой предпосылкой для анализа особенностей построения IoT-архитектуры на предприятиях авиационной промышленности, где требования к надёжности и безопасности технологических процессов существенно превышают среднеотраслевые показатели.

Теоретическая часть

Одним из наиболее устойчивых заблуждений, характерных для практики внедрения технологий промышленного интернета вещей, является отождествление ПоТ с системами управления технологическими процессами или попытка рассматривать их в отношениях конкуренции или замещения [4]. Между тем фундаментальная архитектурная логика обеих технологий исключает подобное соотношение. ПоТ не призван выполнять функции программируемых логических контроллеров или распределённых систем управления в задачах управления оборудованием в режиме реального времени, где детерминированность отклика измеряется миллисекундами, а отказ управляющей системы влечёт прямую угрозу безопасности технологического процесса. Архитектурная роль ПоТ состоит в формировании надстроечного аналитического слоя над классической пятиуровневой иерархической моделью промышленного предприятия, закреплённой в стандарте ISA-95 и известной как Purdue Model, где данные, собранные с полевого уровня агрегируются и передаются системам поддержки принятия решений, не вмешиваясь в управляющий контур нижележащих уровней.

Критический анализ российской практики внедрения проектов под брендом ПоТ обнаруживает характерную закономерность, фиксируемую в отраслевых публикациях. Значительная часть реализованных решений фактически сводится к подключению датчиков к системам визуализации и отображению телеметрии в пользовательских графиках, то есть по существу представляет собой расширение функциональности SCADA-систем, а не создание принципиально новой информационно-аналитической инфраструктуры. Подобный подход действительно повышает наблюдаемость процесса, однако он не реализует архитектурный потенциал ПоТ. Корень этого расхождения между декларируемыми целями и реальными результатами внедрения лежит именно в отсутствии чёткого понимания того, на каком уровне иерархии ISA-95 ПоТ начинает выполнять самостоятельную архитектурную функцию и какова природа границы между операционно-технологическим и информационно-технологическим доменами предприятия.

Эталонной архитектурной моделью для систем промышленного интернета вещей служит IIRA (Industrial Internet Reference Architecture), разработанная Industry IoT Consortium при участии IBM, GE, Oracle, SAP и Toshiba. Данная модель описывает систему ПоТ через пять функциональных доменов, каждый из которых соответствует определённому уровню производственной иерархии и выполняет строго очерченную функцию. Домен "Control" охватывает детерминированное управление исполняющими механизмами в режиме реального времени. По существу, этот домен полностью совпадает с тем, что в российской нормативной базе обозначается как АСУ ТП, и регулируется ГОСТ Р

71765–2024. Домен "Operations" представляет собой пограничную зону, в которой функции диспетчеризации, планирования технического обслуживания и управления качеством реализуются на уровне MES и требуют взаимодействия как с нижележащим доменом полевого уровня, так и с вышестоящими аналитическими слоями. Домен "Information" является ключевой областью где осуществляются агрегация, хранение и предобработка потоков данных, поступающих с оборудования, и формируется единое информационное пространство предприятия. Домены "Application" и "Business" надстраиваются над информационным слоем и обеспечивают соответственно аналитические функции и интеграцию с системами корпоративного управления уровня ERP и BI. Для авиационного производства принципиально важно разграничение между доменом "Control", в котором любое нарушение детерминированности недопустимо в силу требований лётной годности и сертификационных регламентов EASA, FAA и ФАВТ, и доменами "Information" и "Application", в которых допустимы характерные для систем задержки и итеративное обновление программного обеспечения.

На практике архитектура ПоТ-системы авиационного производства реализуется в виде четырёх последовательных уровней, каждый из которых выполняет функционально обособленную роль и взаимодействует с соседними уровнями через строго определённые протоколы [5]. Полевой уровень образован совокупностью первичных источников данных, такими как датчики вибрации, датчиками крутящего, акселерометрами на роботизированных системах, RFID-метками на комплектующих и прочих. Характерным примером реализации служит практика Airbus, где каждое усилие затяжки крепёжного элемента автоматически записывается в базу данных и становится частью электронного досье изделия, обеспечивая прослеживаемость на протяжении всего жизненного цикла воздушного судна. Граничный уровень представлен промышленными шлюзами и edge-серверами, выполняющими первичную обработку данных, их фильтрацию и агрегацию, а также протокольную конвертацию, без которой передача данных с полевого уровня на уровни выше была бы невозможна. Так, на заводе Airbus Saint Eloi, применяются вычислительные узлы HPE с задержкой обработки 50 миллисекунд, обеспечивающие сбор и первичную обработку потоков данных от роботизированных линий сверления, производящих свыше 120 миллионов отверстий в год. Платформенный уровень концентрирует в себе брокеры сообщений на основе MQTT и Apache Kafka, базы данных временных рядов и серверы агрегации. Именно на этом уровне реализуется так называемая концепция «Unified Namespace», то есть концепция единого пространства имён, в котором все источники данных завода публикуют свои значения в стандартизированной иерархической структуре, а все потребляющие системы подписываются на интересующие их данные, устраняя

необходимость в многочисленных точечных интеграциях между отдельными системами.

Выбор коммуникационных протоколов представляет собой одно из ключевых архитектурных решений при построении ПоТ-системы, поскольку именно протоколы определяют границы возможного на каждом уровне иерархии и задают характер взаимодействия между операционно-технологическим и информационно-технологическим доменами [6].

Заключение

Авиационная промышленность ужесточает требования обязывающие обеспечивать полную прослеживаемость каждой производственной операции, и в силу многолетнего горизонта эксплуатации исключает замену полевого уровня, что в совокупности определяет принцип «наложения» ПоТ-платформы поверх действующей АСУ ТП через шлюзовой уровень как единственно допустимую архитектурную стратегию.

Список литературы

1. Industrial Internet Consortium. Industrial Internet Reference Architecture v1.10. — ИС, 2019.
- ГОСТ Р 71765—2024. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Общие требования. — М.: Росстандарт, 2024.
2. ГОСТ Р 70924-2023 (ИСО/МЭК 30141:2018). Интернет вещей. Эталонная архитектура. — М.: Росстандарт, 2023.
- ОСП.РУ. «АСУ ТП» или «Промышленный интернет вещей». 2016. URL: <https://www.osp.ru/eforum/2016/10/13050649.html>
3. Springer. Industry 4.0 in Aircraft Manufacturing: Innovative Use Cases and Patent Landscape. 2024.
4. Hilscher. IIoT protocols: OPC UA and MQTT. — URL: <https://www.hilscher.com/technology/industrial-iiot-protocols-opc-ua-and-mqtt>

УДК 004.89

МОШКИН В.С., МЫТАРИН Е.С.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЁМ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЧЁТКОЙ ОНТОЛОГИИ

Аннотация. В статье предложен гибридный подход к семантическому обнаружению аномалий во временных рядах сложных технических систем, сочетающий нейросетевую модель LSTM-autoencoder и нечеткую онтологию. Подход обеспечивает не только

высокую точность детектирования отклонений, но и содержательную интерпретацию на основе формализованных экспертных знаний. Эксперименты на данных мониторинга ветрогенератора подтвердили эффективность метода, продемонстрировав точность обнаружения аномалий до 97,4 % и значительное снижение ложных срабатываний по сравнению с классическими нейросетевыми и онтологическими подходами. Программная система, реализующая разработанный подход, позволяет повысить интерпретируемость результатов диагностики и пригодна для применения в системах предиктивного обслуживания и мониторинга состояния технических объектов.

Ключевые слова: обнаружение аномалий, временные ряды, сложные технические системы, LSTM-autoencoder, нечеткая онтология, семантическая интерпретация, гибридный подход, предиктивная диагностика, машинное обучение.

Определение аномалий во временных рядах — это задача, требующая учёта временных зависимостей, неопределённости данных и необходимости содержательной интерпретации результатов [1]. В настоящее время для анализа временных рядов широко применяются методы машинного обучения, в том числе глубокие нейросетевые архитектуры (автоэнкодеры, LSTM), а также методы, основанные на формализации знаний (онтологии, нечеткая логика) [2]. Однако каждый из этих подходов в отдельности имеет ограничения: нейросетевые модели часто остаются «чёрным ящиком», а классические экспертные системы плохо адаптируются к динамическим изменениям в данных [3].

В данной работе рассматривается гибридный подход, сочетающий методы машинного обучения для анализа временных рядов и нечеткие онтологии для семантической интерпретации результатов [4].

Такой синтез позволяет не только повысить точность обнаружения аномалий, но и обеспечить прозрачность и обоснованность диагностических выводов, что особенно важно для ответственных применений в области мониторинга состояния СТС.

Формально процесс преобразования представлен на рисунке 1. Каждый этап преобразования, представленный на данном рисунке, включает операции, направленные на приведение данных к единой структуре.

На первом этапе выполняется агрегация сырых телеметрических сигналов от датчиков и систем контроля (SCADA, MES).

Исходный набор данных представляется как множество многомерных временных рядов:

$$D = \{TS_1, TS_2, \dots, TS_m\},$$

где m — количество контролируемых параметров, а каждый ряд TS_i является последовательностью пар (t_j, p_{ij}) , состоящих из временной метки t_j и значения параметра p_{ij} .

На втором этапе выполняется преобразование векторных и тензорных величин в скалярные инварианты.

В системе применяются специализированные функции принадлежности, адаптированные к характеристикам различных диагностируемых параметров [5]. Используются трапециевидные функции с неограниченными диапазонами для крайних термов, треугольные и трапециевидные функции для средних термов, а также специальные функции для детектирования специфических аномальных событий.

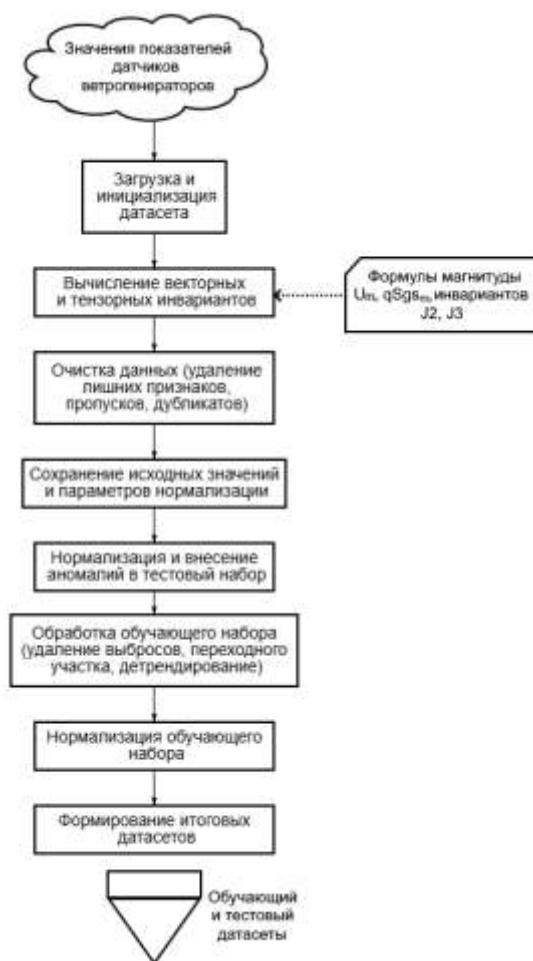


Рисунок 1 - Предобработка и преобразование телеметрических данных

Каждая функция принадлежности задается параметрически в конфигурации системы.

Пример задания функций принадлежности для одного показателя представлен на рисунке 2.

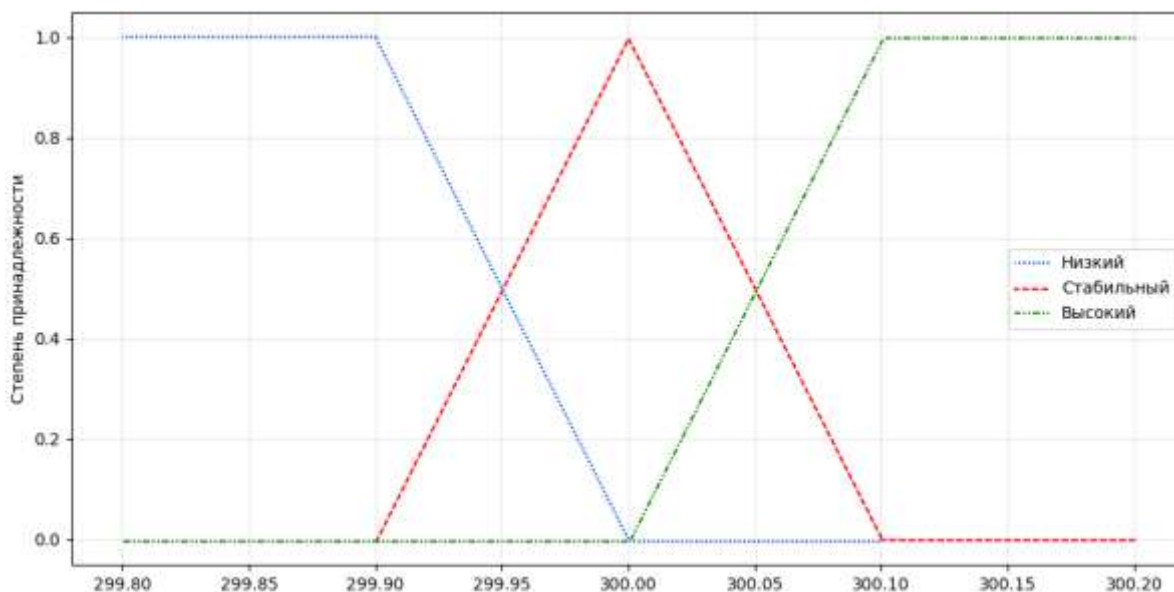


Рисунок 2 - Функции принадлежности для одного показателя

Семантическая интерпретация и выявление аномалий осуществляются через систему нечетких SWRL-правил. Пример правила выявления аномалий на основе нечетких термов одного показателя.

$\text{Sensor}(?s) \wedge \text{hasMetric}(?s, ?m) \wedge \text{Metric}(?m) \wedge \text{hasName}(?m, \text{'Pressure'}) \wedge \text{hasMeaning}(?m, ?val) \wedge \text{Meaning}(?val) \wedge \text{hasState}(?val, ?st) \wedge \text{hasName}(?st, \text{'Low'}) \wedge \text{hasDegreeOfConfidence}(?st, ?deg) \wedge \text{swrlb:equal}(?deg, 1) \rightarrow \text{hasAnomaly}(?val, \text{'Rule_1'}) \wedge \text{hasInterpretation}(?val, \text{'Critical low pressure'})$.

Эффективность гибридного подхода подтверждается сравнительным анализом. На рисунке 3 представлен график ошибок реконструкции для показателя давления с установленным порогом детектирования. Пики, превышающие порог, соответствуют аномалиям, обнаруженным нейросетевой моделью.

Последующая онтологическая фильтрация позволяет отсеять часть ложных срабатываний и присвоить аномалиям содержательные интерпретации, такие как «Критическое падение давления при стабильной температуре».

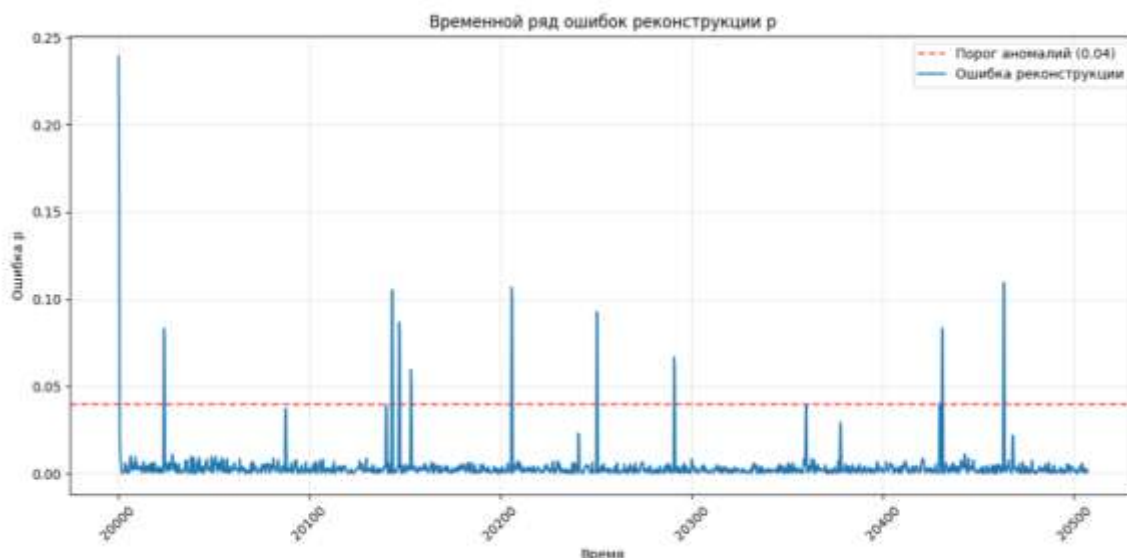


Рисунок 3 - График ошибок реконструкций

Таким образом, гибридный алгоритм демонстрирует способность не только детектировать точечные и комплексные аномалии в многомерных временных рядах, но и обеспечивать их содержательную, семантически обогащенную интерпретацию на основе формализованных экспертных знаний.

В результате проведенного исследования разработан и апробирован гибридный подход к семантическому обнаружению аномалий во временных рядах СТС, интегрирующий нейросетевую модель LSTM-autoencoder и нечеткую онтологическую модель. Предложенная методология обеспечивает не только высокоточное выявление отклонений, но и их содержательную, семантически обогащенную интерпретацию на основе формализованных экспертных знаний.

Экспериментальная оценка на данных мониторинга ветрогенератора подтвердила эффективность гибридного подхода. Разработанная система продемонстрировала наивысшую точность обнаружения (Precision = 0,974), минимальные значения ошибок реконструкции и значительное сокращение ложных срабатываний по сравнению с изолированным использованием нейросетевой модели или гибридной системы с классической онтологией. Ключевым достижением является обеспечение высокой интерпретируемости результатов, что критически важно для принятия обоснованных решений в диагностике и предиктивном обслуживании.

Список литературы

1. Singh J., Shah O.A., Arora S. Smart Grid Cybersecurity: Anomaly Detection in Solar Power Systems Using Deep Learning // Energy Storage and Saving. 2025.
2. Мосин В.Г., Козловский В.Н., Пантюхин О.В. Детекция аномалий информационного канала на основе прогнозирующих моделей в решении задач анализа

качества контента / В. Г. Мосин, // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 3. С. 421–425.

3. Lutsenko V.V., Kuchеров N. N., Gladkov A. V. Predicting Traffic Congestion Based on Time Series Analysis // Modern Science and Innovations. 2023. Vol. 1(41). pp. 47–55.

4. Сафронов, Д. А., Кацер Ю.Д., Зайцев К.С. Поиск аномалий с помощью автоэнкодеров // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 8. С. 39–45.

5. Yarushkina N., Andreev I., Moshkin V., Moshkina I. (2019) Integration of Fuzzy OWL Ontologies and Fuzzy Time Series in the Determination of Faulty Technical Units. In: Misra S. et al. (eds) Computational Science and Its Applications – ICCSA 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11619. Springer, Cham, pp 545-555, https://doi.org/10.1007/978-3-030-24289-3_40

УДК 004.89

МОШКИН В.С., ГУРЬЯНОВ А.В.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ 3D-ОБЪЕКТОВ

***Аннотация.** В данной статье производится сравнение четырёх больших языковых моделей в задаче генеративного проектирования. Сравниваются модели Qwen3VL-30B-Thinking, Qwen3.5-35B, GPT-5.2 и Deepseek-V3.1-671B. Сравнение производится по результатам пяти экспериментов, состоящих из генерации на основе текстовых описаний и изображений пяти разных CAD-моделей на скриптовом языке CAD-моделирования OpenSCAD. По результатам экспериментов сделан вывод, что модели, обладающие способностями к зрению, лучше справляются с поставленной задачей, чем исключительно текстовые модели. Полученные результаты указывают на существование предпосылок, позволяющих утверждать, что модели со способностями к зрению обладают лучшим пространственным мышлением. Кроме того, обнаружено, что способности к зрению семейства моделей Qwen показали значительный рост между их первой и второй итерациями.*

***Ключевые слова:** большие языковые модели, генеративное проектирование, автоматизация проектирования, CAD-моделирование, OpenSCAD.*

Создание артефактов производства (моделей деталей для CAD-систем, семантических структур, последовательностей действий, инструкций, чертежей и т.д.) – крайне время- и трудозатратный процесс. Его автоматизация классическими алгоритмическими методами

практически не представляется возможной из-за сложности и многогранности данного процесса [1].

Генеративное проектирование – итеративный процесс взаимодействия человека и специализированного ПО, нацеленный на упрощение и ускорение процесса создания артефактов производства [2]. Генеративное проектирование в основном применяется для автоматизации и ускорения создания CAD-моделей нетипичных инженерных объектов с геометрией простой и средней сложности. Оно также может применяться для быстрого создания и прототипирования в прикладной 3D-печати, а также для оптимизации конструкций [3].

Первые изыскания на тему генеративного проектирования с помощью больших языковых моделей (Large Language Models, LLM) берут своё начало вскоре после появления первых практически применимых LLM в конце 2010-х – начале 2020-х гг. [4] Каких-либо значимых результатов они стали добиваться лишь после появления моделей на уровне GPT-4 в 2023 году [5]. Развитие и распространение мультимодальных моделей, а также таких методов взаимодействия, как цепочки рассуждений и агентные рабочие процессы, в 2024-2025 гг. дало новый толчок развитию данной темы.

В данной работе производится предварительная оценка применимости ряда актуальных на данный момент LLM в задаче генеративного проектирования.

В качестве формата описания CAD-моделей в экспериментах был выбран язык OpenSCAD. Это скриптовый язык CAD-моделирования, описывающий модели через геометрические примитивы и их объединения, исключения и другие операции. В отличие от описаний 3D-моделей «в лоб» через прямое задание координат вершин и плоскостей, OpenSCAD ближе по своей структуре и сути к языкам программирования, лучше воспринимается, проще читается и более компактен. Данные характеристики делают язык OpenSCAD более интуитивным для понимания и значительно более подходящим для использования большими языковыми моделями, традиционно имеющими проблемы с точным пространственным мышлением.

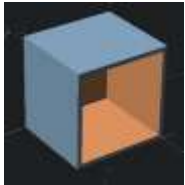
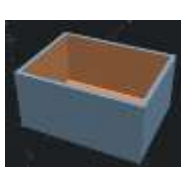
С каждой моделью было проведено 5 экспериментов, проверяющих их способности к генерации CAD-моделей на языке OpenSCAD из текстовых описаний. Запросы делались на английском языке, поскольку для абсолютного большинства больших языковых моделей именно английский язык является первичным, будучи представленным в их обучающих выборках в наибольшей степени по сравнению с другими языками.

1. Первый эксперимент – генерация простой коробки-контейнера с пятью стенками и полостью внутренностью. Это одна из геометрически простейших полезных в быту вещей. Если модель не справляется с её

генерацией, крайне маловероятно, что она сможет сгенерировать что-то более геометрически сложное (Таблица 1).

Запрос в данном эксперименте имеет следующий вид: *«Write an OpenSCAD script that describes a simple box container. Make the width, height, depth and wall thickness parametric»*.

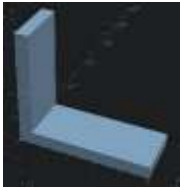
Таблица 1 – Результаты первого эксперимента

Qwen3VL-30B-Thinking	Qwen3.5-35B	GPT-5.2	Deepseek-V3.1-671B
			

2. Второй эксперимент – генерация простого L-образного кронштейна. Такая вещь также имеет множество применений, но её геометрическое описание несколько сложнее (Таблица 2).

Запрос в данном эксперименте имеет следующий вид: *«Write an OpenSCAD script that describes a simple L-shaped bracket. Make its length and height parametric.»*.

Таблица 2 – Результаты второго эксперимента

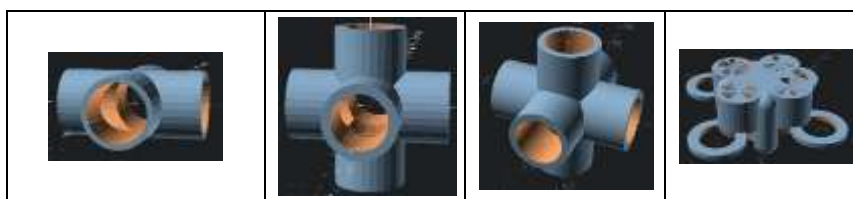
Qwen3VL-30B-Thinking	Qwen3.5-35B	GPT-5.2	Deepseek-V3.1-671B
			

3. Третий эксперимент – генерация простого 4-х стороннего соединителя для труб. Данная деталь также не столь сложна в описании, но имеет в своей конструкции формы, отличные от призм, а именно – цилиндры. Кроме того, данный эксперимент сопровождается изображением желаемой детали, и в случае с моделями, обладающими способностями к зрению, в его ходе проверяется их способность сопоставлять входные изображения с желаемым результатом-кодом OpenSCAD (Таблица 3).

Запрос в данном эксперименте имеет следующий вид: *«Write an OpenSCAD script that describes a simple 4-way pipe connector (see image). Make the diameter of the hole and the thickness of the pipe parametric»*.

Таблица 3 – Результаты третьего эксперимента

Qwen3VL-30B-Thinking	Qwen3.5-35B	GPT-5.2	Deepseek-V3.1-671B



4. Четвёртый эксперимент – генерация поллой вазы. В данном эксперименте отсутствует конкретное описание желаемой формы и проверяется не только способность моделей генерировать более сложные формы, но и их творческие возможности.

Запрос в данном эксперименте имеет следующий вид: «*Write an OpenSCAD script that describes a hollow vase with one opening at the top*» (Таблица 4).

Таблица 4 – Результаты четвёртого эксперимента

Qwen3VL-30B-Thinking	Qwen3.5-35B	GPT-5.2	Deepseek-V3.1-671B
Модель не валидна			

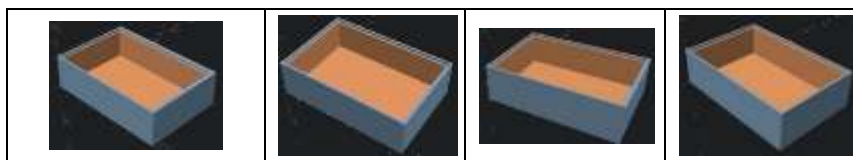
5. Пятый эксперимент – проверка способностей моделей редактировать существующий код OpenSCAD. Для этого им предоставляется описание коробки-контейнера с закруглёнными углами и крышкой и предлагается убрать закруглённость углов контейнера, сделав их прямыми и острыми.

Особая сложность здесь заключается в том, что, хотя модель параметрическая, закруглённые углы контейнера описываются цилиндрами, а потому задание радиуса углов, равным нулю, делает его модель не валидной, из-за чего для достижения желаемого результата требуется более тонкий, менее очевидный подход. В ходе этого эксперимента моделям, обладающим способностями к зрению, также предоставляется изображение коробки-контейнера в исходном виде, с закруглёнными углами (Таблица 5).

Запрос в данном эксперименте имеет следующий вид: «*Below is an OpenSCAD script that describes a simple box with rounded corners (see attached image). Edit the script so that the corners aren't rounded but instead sharp. *описывающий контейнер скрипт OpenSCAD**».

Таблица 5 – Результаты пятого эксперимента

Qwen3VL-30B-Thinking	Qwen3.5-35B	GPT-5.2	Deepseek-V3.1-671B
----------------------	-------------	---------	--------------------



По результатам проведённых экспериментов можно сделать вывод, что модели со способностями к зрению действительно обладают лучшим пространственным мышлением и заметно лучше справляются с задачами генерации CAD-моделей по сравнению с исключительно текстовыми моделями, даже с большим отрывом в количестве параметров в пользу последних.

Модель Qwen3VL-30B-Thinking, обладающая способностями к зрению, будучи более чем в 20 раз меньше в размере, чем Deepseek-V3.1-671B, не обладающая ими, показала сравнительно намного лучшие результаты: обе модели провалили эксперимент №4, но в эксперименте №3, где Deepseek-V3.1-671B не произвела ничего даже отдалённо напоминающего желаемый результат, Qwen3VL-30B-Thinking допустила лишь нефундаментальные и несложные в исправлении ошибки. Qwen3.5-35B показала себя в целом заметно лучше, чем Qwen3VL-30B-Thinking: она не только выполнила эксперимент №4, с которым не справилась её предшественница, но и превзошла гораздо более мощную модель GPT-5.2, создав более функциональную вазу. Кроме того, она избежала ошибки, допущенной её предшественницей в эксперименте №5, и потребовала гораздо меньшего количества и объёма исправлений.

Список литературы

1. Daareyni A., Martikkala A., Mokhtarian H. Generative AI meets CAD: enhancing engineering design to manufacturing processes with large language models. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 5. pp. 1893–1902. doi: 10.1007/s00170-025-15830-2.
2. Deng H., Khan S., Erkoyuncu J.A. An Investigation on Utilizing Large Language Model for Industrial Computer-Aided Design Automation. *Procedia CIRP*. 2024. Vol. 128. pp. 221–226. doi: 10.1016/j.procir.2024.07.049.
3. Guryanov A. V., Moshkin V. S. Modern Large Language Models in Generative Design," 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2026, pp. 964-968, doi: 10.1109/ICIEAM69213.2026.1154967.
4. Ma K., Grandi D., McComb C., Goucher-Lambert K. Conceptual Design Generation Using Large Language Models. arXiv: 2306.01779. 2023.
5. Wu S., Khasahmadi A., Katz M., Jayaraman P.K., Pu Y., Willis K., Liu B. CAD-LLM: Large Language Model for CAD. *NeurIPS 2023 Workshop on Machine Learning for Creativity and Design*. 2023.

УДК 004.89

МОШКИН В.С., КАШИН М.И.

Ульяновский государственный технический университет, г.Ульяновск,
Россия

МОДЕЛЬ РЕЛЕВАНТНОСТИ ДОКУМЕНТОВ В МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ RAG-СИСТЕМЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОМОЩНИКА

***Аннотация.** В статье рассматривается подход к оценке релевантности документов в мультимодальной RAG-системе интеллектуального помощника. Актуальность исследования связана с тем, что качество генеративного ответа определяется не только языковой моделью, но и составом внешнего контекста, переданного ей перед формированием результата. Предлагается гибридная модель ранжирования, сочетающая семантическую близость запроса и документа, попарную оценку соответствия, тематическую согласованность, признаки надежности источника и актуальности сведений. Отдельно рассматривается задача поддержания качества базы знаний за счет оценки дублирования новых документов. Показано, что разделение задачи на две взаимосвязанные оценки - релевантность фрагмента запросу и новизну документа для базы знаний - позволяет повысить устойчивость RAG-системы и снизить риск включения в контекст нерелевантных, устаревших или повторяющихся источников.*

***Ключевые слова:** RAG-система, релевантность документов, интеллектуальный помощник, семантический поиск, ранжирование, метаданные, дублирование документов, база знаний, авиастроение.*

Современные интеллектуальные помощники все чаще строятся на основе подхода Retrieval-Augmented Generation [1], при котором языковая модель [2] формирует ответ не только на базе внутренних параметров, но и с учетом документов, найденных перед генерацией. Для прикладных задач это особенно важно. Пользователь ожидает не общий текст, а ответ, связанный с конкретными инструкциями, нормативами, технологическими картами или отчетами. Следовательно, качество поиска напрямую влияет на качество итогового ответа. Если в контекст попадает нерелевантный или устаревший документ, модель может дать неполную рекомендацию, ошибочную ссылку или смешать сведения из разных источников. Целью работы является разработка модели оценки релевантности документов, предназначенной для отбора фрагментов базы знаний при формировании ответа интеллектуального помощника.

Предлагаемый подход к оценке релевантности документов основан на представлении базы знаний как набора нормализованных смысловых фрагментов, связанных с описательными признаками исходного документа. Это позволяет сопоставлять разнородные источники: нормативные документы, отчеты, инструкции и табличные материалы, приведенные к единому текстовому виду. [3] Документ рассматривается не как единый объект, а как совокупность фрагментов, поскольку

пользовательский запрос чаще всего относится к конкретному требованию, операции, определению или результату испытаний. Разбиение текста с перекрытием сохраняет локальный контекст и снижает риск потери значимых связей на границах абзацев.

Ключевым элементом подхода является воспроизводимый алгоритм: извлечение содержимого, фрагментация, расчет признаков, первичный отбор кандидатов, уточняющее ранжирование и контроль качества базы знаний. При этом одной семантической близости недостаточно для обоснованного выбора источника, так как похожие по смыслу фрагменты могут различаться надежностью, полнотой, актуальностью и тематической принадлежностью. Поэтому в модель включаются метаданные, отражающие происхождение документа, его категорию, качество и временную актуальность. Это делает ранжирование более интерпретируемым, поскольку итоговая оценка формируется не только моделью, но и явно заданными критериями отбора.

Для сочетания качества и вычислительной эффективности используется двухэтапная схема ранжирования. На первом этапе bi-encoder [4] строит векторные представления запроса и фрагментов документов, после чего по косинусной близости выбирается ограниченный набор кандидатов. Этот этап решает задачу широкого семантического поиска и отбрасывает явно нерелевантные фрагменты. На втором этапе cross-encoder [5] анализирует пару «запрос - фрагмент» совместно и уточняет порядок найденных кандидатов, что особенно важно при близких по тематике документах.

Итоговая оценка задается как взвешенная сумма частных критериев. Наибольший вес получает попарная оценка cross-encoder, поскольку она точнее отражает соответствие фрагмента конкретному запросу. Векторная близость сохраняется как устойчивый семантический сигнал, а признаки категории, надежности и актуальности корректируют результат с учетом свойств источника. Тем самым модель сочетает машинное ранжирование и экспертно интерпретируемые факторы качества.

$$score = 0,70 \cdot cross + 0,15 \cdot vector + 0,07 \cdot category + 0,04 \cdot authority + 0,04 \cdot freshness.$$

Формула 1. Расчет итоговой оценки

Качество RAG-системы определяется не только алгоритмом поиска, но и состоянием базы знаний. Если база содержит большое количество повторяющихся или почти совпадающих документов, возрастает риск избыточного контекста, смещения выдачи в сторону дублей и некорректного выбора версии источника. Поэтому при добавлении нового документа оценивается его близость к уже имеющимся материалам. Коэффициент дублирования объединяет семантическое сходство и

пересечение терминов: первый компонент выявляет смысловую близость, второй фиксирует совпадение предметной лексики.

$$\text{duplicate_score} = 0,65 \cdot \text{vector_score} + 0,35 \cdot \text{term_overlap}.$$

Формула 2. Расчет оценки дубликата

$$\text{upload_score} = 1 - \text{duplicate_score}.$$

Формула 3. Расчет оценки новизны документа

Показатель `upload_score` интерпретируется как мера новизны документа для базы знаний. Низкое значение означает, что новый файл почти повторяет существующий источник и должен рассматриваться как возможная замена версии. Промежуточное значение указывает на частичное совпадение и требует экспертной проверки. Высокое значение показывает, что документ вносит новую информацию и может быть добавлен в базу. Таким образом, в работе выделяются две главные оценки: `score` используется при выборе релевантных фрагментов для ответа, а `duplicate_score` и `upload_score` для управления качеством и непротиворечивостью базы знаний (рис.1).



Рисунок 1 - Пороговая логика решения при загрузке документа

Для проверки предложенного подхода использовались метрики ошибки и ранжирования. MAE составила примерно 0,269, RMSE - примерно 0,327, что характеризует расхождение между расчетной и ожидаемой оценкой релевантности. Для RAG-системы особенно важна верхняя часть выдачи, поскольку именно она формирует контекст генерации. Поэтому дополнительно оценивались `Precision@5` и `nDCG@5` : полученные значения около 0,942 и 0,937 показывают, что первые найденные документы в основном релевантны и хорошо упорядочены.

Практическая значимость модели зависит от того, сохраняет ли она приемлемое время ответа при росте базы знаний. Эксперимент показал, что при увеличении базы с 250 до 4000 документов время прогноза возрастает примерно с 4,5 до 50,7 миллисекунды. Такой результат подтверждает применимость двухэтапного подхода: быстрый семантический отбор ограничивает число кандидатов, а более точная попарная модель применяется только к наиболее вероятным фрагментам.

Следовательно, повышение качества ранжирования не приводит к непропорциональному росту вычислительных затрат (рис.2).



Рисунок 2 - Рост времени прогноза при увеличении базы знаний

В работе предложена модель релевантности документов для мультимодальной RAG-системы интеллектуального помощника. Модель объединяет быстрый семантический поиск, уточняющее попарное ранжирование и контекстные признаки документа, что позволяет рассматривать релевантность как многокритериальную оценку. Дополнительный механизм контроля дублирования поддерживает качество базы знаний и снижает вероятность использования повторяющихся или устаревших источников. Дальнейшее развитие исследования связано с расширением набора модальностей, учетом изображений и таблиц через специализированные эмбединги, а также с адаптацией весов модели на основе экспертной и пользовательской обратной связи.

Список литературы

1. Gao Y. et al. Retrieval-augmented generation for large language models: A survey //arXiv preprint arXiv:2312.10997. – 2023.
2. Mansurova A., Mansurova A., Nugumanova A. QA-RAG: Exploring LLM reliance on external knowledge //Big Data and Cognitive Computing. – 2024. – Т. 8. – №. 9. – С. 115.
3. Наместников, А. М., Филиппов, А. А., Мошкин, В. С., & Ярушкина, Н. Г. Модель социального портрета пользователя социальной сети на основе семантического анализа слабоструктурированного контента профиля //ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». – 2019. – С. 336.
4. Park Y., Shin Y. Adaptive bi-encoder model selection and ensemble for text classification //Mathematics. – 2024. – Т. 12. – №. 19. – С. 3090.
5. Pradeep R. et al. Squeezing water from a stone: a bag of tricks for further improving cross-encoder effectiveness for reranking //European Conference on Information Retrieval. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 655-670.

УДК 004.89

МАШКОВ Н. А., ГУСЬКОВ Г. Ю.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАЯВОК В ЕДИНУЮ ДИСПЕТЧЕРСКУЮ СЛУЖБУ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. В работе решается задача автоматического отнесения текстовых заявок жителей к виду работ по справочнику ЖКХ. Обычно для этого обучают одну модель на все категории сразу. Мы предлагаем другой подход: сначала модель выбирает одну из девяти крупных групп, затем вторая модель уточняет вид работ внутри этой группы. На данных около 119 тыс. заявок такая схема даёт меньше путаницы между похожими категориями из разных групп. Лучший вариант на признаках TF-IDF на тестовой выборке из 23,8 тыс. заявок показывает 91,3 % правильных ответов по итоговой категории и 94,8 % по крупной группе. Это выше результатов из литературы для плоской классификации в той же области.

Ключевые слова: ЖКХ, ЕДС, классификация текстов, иерархия категорий, TF-IDF, машинное обучение, заявки жителей.

В единую диспетчерскую службу (ЕДС) поступают короткие тексты: жалобы на протечку, отсутствие отопления, шум и т.п. Оператор должен вручную выбрать вид работ по справочнику ЖКХ — всего 43 категории, объединённых в 9 крупных групп [1]. Это занимает время, а разные операторы иногда относят похожие заявки к разным категориям. Из-за ошибки заявка может уйти не в ту службу. По данным зарубежных исследований, часть такой работы можно передать алгоритмам обработки текста [2].

Распространённый вариант — одна модель сразу на все 43 категории. Для ЖКХ при использовании TF-IDF в литературе получают около 69–75 % правильных ответов [1]. Многие категории описываются похожими словами, хотя относятся к разным службам. Например, модель путает отопление и горячее водоснабжение [3].

Мы проверили, поможет ли учёт иерархии справочника, который уже используется в ЕДС. Схема из двух шагов: сначала модель выбирает одну из девяти крупных групп, затем для этой группы работает отдельный классификатор только по её категориям (всего 43 вида работ) [4]. Если на первом шаге группа выбрана неверно, итоговый ответ тоже будет неверным. Зато на втором шаге модель выбирает из меньшего числа вариантов и уже знает, в какой группе искать.

Перед обучением текст приводят к единому виду: нижний регистр, удаление лишних символов. Затем строят признаки TF-IDF по отдельным

словам и парам слов [5]. Для выбора крупной группы сравнивали несколько линейных классификаторов; лучше всех сработал линейный метод опорных векторов (SVM) с приведением оценок к вероятностям [6]. Для уточнения категории внутри каждой группы обучали свой набор признаков и свою модель; наилучший результат дал случайный лес. Если по какой-то категории мало примеров, для неё задавался больший вес при обучении.

Эксперименты проводили на 118 909 заявках с непустым текстом и готовой разметкой. Крупную группу для каждой заявки определяли по таблице соответствия «категория — группа». Данные делили на обучение и тест в пропорции 80/20 так, чтобы в тесте сохранились те же доли групп; на тесте осталось 23 800 заявок. Засчитывался ответ только если верно указаны и группа, и итоговая категория.

Перебрали 20 сочетаний моделей для первого и второго шага. Лучший результат — SVM на первом шаге и случайный лес на втором: 91,3 % по итоговой категории и 94,8 % по крупной группе. Более простой вариант с логистической регрессией на первом шаге дал 84,0 %, что уже выше плоской классификации из [1]. Значит, улучшение связано не только с выбором конкретных алгоритмов, но и с самим разбиением задачи на два шага.

При разборе ошибок видно: чаще всего ошибаются на выборе крупной группы. Если группа угадана верно, вторая модель справляется заметно лучше. Категории, по которым в обучении было очень мало примеров, по-прежнему определяются плохо — это обычная ситуация для задач с большим числом редких классов [7].

Таким образом, двухуровневая схема с учётом иерархии справочника даёт заметный рост точности по сравнению с одной моделью на все категории. Решение реализовано в виде REST-сервиса для подключения к CRM и ЕДС. В дальнейшем планируется собрать больше примеров для редких категорий и сравнить TF-IDF с нейросетевыми моделями при одинаковых условиях эксперимента.

Список литературы

1. Кочеткова М.Д., Гуськов Г.Ю., Моисеев В.В., Кандаулов В.М. Исследование и разработка методов обработки обращений на естественном языке в задаче классификации по категориям классификатора проблем ЖКХ / Прикладные информационные системы (ПИС-2024) : X Международная научно-практическая конференция. — 2025. — С. 51.
2. Fuchs L., Winkler T., Zilker S. Improving ticket systems with machine learning: A literature review / Proceedings of the 55th Hawaii International Conference on System Sciences. — 2022. — P. 1234–1243.
3. Silla C. N., Freitas A. A. A survey of hierarchical classification across different application domains. — Data Mining and Knowledge Discovery. — 2011. — Vol. 22, No. 1. — P. 31–72.

4. Шурыгина О.В., Цуканова Н.И. Исследование зависимости точности иерархического классификатора текста от структуры и состава ансамбля нейронных сетей. — Сборник научных трудов. — 2022. — С. 47–55.
5. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to information retrieval. — Cambridge : Cambridge University Press, 2008. — 482 p.
6. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks. — Machine Learning. — 1995. — Vol. 20, No. 3. — P. 273–297.
7. Sebastiani F. Machine learning in automated text categorization. — ACM Computing Surveys. — 2002. — Vol. 34, No. 1. — P. 1–47.
8. Kowsari K., Jafari Meimandi K., Heidarysafa M., Mendu S., Barnes L., Brown D. Text classification algorithms: A survey. — Information. — 2019. — Vol. 10, No. 4. — Art. 150.
9. Скворцов А.В. Сравнительный анализ методов векторизации текста для задач классификации на русском языке. — Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2025. — № 2 (236). — С. 12–25.
10. Minaee S., Kalchbrenner N., Cambria E., Nikzad N., Chenaghlu M., Gao J. Deep learning-based text classification: A comprehensive review. — ACM Computing Surveys. — 2021. — Vol. 54, No. 3. — P. 1–40.

УДК 004.932.75'1

БАШАРИН С.В., ГУСЬКОВ Г.Ю.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕР- РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТА

***Аннотация.** В работе рассматривается задача повышения качества оптического распознавания текста на изображениях низкого качества. Проведён анализ существующих подходов к применению методов супер-разрешения в OCR-системах. Показано, что большинство современных решений ориентированы на улучшение визуального качества изображения и оцениваются преимущественно по метрикам PSNR и SSIM, которые не всегда коррелируют с качеством распознавания текста. Предложен текст-ориентированный подход, основанный на предварительной детекции текстовых областей, последующем восстановлении только текстовых фрагментов с использованием и сравнении результатов распознавания до и после применения супер-разрешения по метрикам CER, WER. Представлена архитектура программной системы и основные направления дальнейших исследований.*

***Ключевые слова:** оптическое распознавание текста, супер-разрешение изображений, обработка изображений, нейронные сети, OCR, компьютерное зрение*

Системы оптического распознавания текста получили широкое распространение в задачах цифровизации документов, автоматизации

документооборота, банковских сервисах и интеллектуальной обработке данных [8–10]. Несмотря на высокий уровень развития современных средств распознавания, качество их работы существенно зависит от характеристик исходного изображения [8, 9].

Наиболее распространёнными причинами снижения точности распознавания являются низкое пространственное разрешение, размытие, шумы, артефакты сжатия и неравномерное освещение. Подобные искажения приводят к потере мелких деталей символов и увеличению количества ошибок [1].

Одним из способов повышения качества входных данных является применение методов супер-разрешения изображений [1, 3, 6, 7]. Однако большинство существующих работ рассматривают супер-разрешение преимущественно как задачу улучшения визуального качества изображения. При этом повышение значений традиционных метрик качества не всегда сопровождается увеличением точности распознавания текста [1, 3].

В большинстве работ, связанных с супер-разрешением, эффективность моделей оценивается по метрикам PSNR и SSIM [3]. Вместе с тем визуальное улучшение изображения не гарантирует повышения качества оптического распознавания текста [1].

В связи с этим актуальной становится задача построения систем супер-разрешения, в которых критерием эффективности выступает качество восстановления текстовой информации.

Первоначально исследование основывалось на классическом конвейере обработки, в котором всё изображение целиком проходило через модель супер-разрешения, после чего выполнялось оптическое распознавание текста.

Проведённый анализ показал ряд ограничений такого подхода. Во-первых, вычислительные ресурсы затрачиваются на обработку всего изображения, включая области, не содержащие текст. Во-вторых, процесс восстановления ориентирован преимущественно на визуальное качество изображения. В-третьих, качество распознавания не участвует в принятии решений о целесообразности применения супер-разрешения.

Для устранения указанных недостатков предлагается последовательность восстановления текстовой информации. На первом этапе выполняется детекция текстовых областей. Далее из изображения извлекаются отдельные текстовые фрагменты. Только после этого применяется самостоятельно обученная модель супер-разрешения, предназначенная для восстановления структуры символов и повышения читаемости текста.

В результате супер-разрешение применяется исключительно к информативным областям изображения и становится частью системы распознавания, а не самостоятельной задачей улучшения изображения.

Список литературы

1. Alahmadi M. D., Alshangiti M. Optimizing OCR performance for programming videos: The role of image super-resolution and large language models // *Mathematics*. 2024. Vol. 12, № 7. P. 1036.
2. Dong C., Loy C. C., He K., Tang X. Image super-resolution using deep convolutional networks // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2016. Vol. 38, № 2. P. 295–307.
3. Wang Z., Chen J., Hoi S. C. H. Deep learning for image super-resolution: A survey // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020. Vol. 43, № 10. P. 3365–3387.
4. Liang J., Cao J., Sun G. et al. SwinIR: Image restoration using Swin Transformer // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2021. P. 1833–1844.
5. Wang X., Liang J., Ding K. et al. Real-ESRGAN: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2021. P. 1905–1914.
6. Ma J., Liang Z., Zhang L. A text attention network for spatial deformation robust scene text image super-resolution // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2022. P. 5911–5920.
7. Ye K., Liu H., Chen Z. et al. TextSR: Diffusion super-resolution with multilingual OCR guidance // *arXiv preprint*. 2025.
8. Ваксина И. Р., Канев А. И., Латыпова К. Н. Оптическое распознавание символов рукописных текстов и табличных данных // *Тенденции развития науки и образования*. 2022. № 86-1. С. 45–49.
9. Shi B., Bai X., Yao C. An end-to-end trainable neural network for image-based sequence recognition // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. Vol. 39, № 11. P. 2298–2304.
10. Baek J., Lee B., Han D. et al. What is wrong with scene text recognition model comparisons? Dataset and model analysis // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2019.

sevabasharin@mail.ru

СЕКЦИЯ 2. КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОСНАСТКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ В АВИАСТРОЕНИИ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

УДК 658.562.3:62-192

БИЗЯЕВ Д. А.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКТИВНОГО И ПРЕВЕНТИВНОГО ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

***Аннотация.** В статье проводится сравнение реактивного и превентивного подходов к управлению надежностью технических систем. Реактивный подход предполагает действия после возникновения отказа, превентивный – предупреждение отказов на основе контроля состояния и прогнозирования. Представлены результаты эксперимента на модели промышленной системы из 100 агрегатов, показывающие сокращение количества отказов в 15,6 раза, времени простоя в 4,1 раза и общих затрат в 3,5 раза при переходе к превентивной стратегии.*

***Ключевые слова:** надежность технических систем, реактивное управление, превентивное обслуживание, прогностическая диагностика, отказы оборудования, время простоя, экономическая эффективность.*

Сложные технические системы стали основой функционирования критически важных отраслей. Отказ такой системы может привести к финансовым потерям, угрозе жизни людей или экологическим катастрофам [1]. Долгое время доминировал реактивный подход: система эксплуатируется до отказа, после чего специалисты устраняют последствия [2]. Однако по мере усложнения техники недостатки этого подхода стали проявляться острее. Рост числа отказов, увеличение времени простоя, высокая нагрузка на персонал потребовали смены парадигмы [3]. В ответ сформировался превентивный подход, основанный на переходе от устранения последствий к предупреждению причин. Цель работы – системное сравнение подходов с представлением экспериментальных данных.

Превентивный подход (от лат. *praevenire* – предупреждать, опережать) представляет собой стратегию управления надежностью, при которой действия по обслуживанию и ремонту выполняются до наступления отказа на основании данных о текущем состоянии системы, прогнозов его изменения или регламентированных сроков, установленных с учетом закономерностей износа [4; 8]. В отличие от реактивной модели,

превентивный подход не рассматривает отказ как неизбежное событие, которое остается только быстро устранить. Вместо этого он исходит из предпосылки, что любой отказ имеет предвестники, и задача системы управления – уловить эти предвестники и своевременно принять меры.

В рамках превентивного подхода выделяют несколько стратегий, различающихся по способу определения момента вмешательства [4]. Регламентированное обслуживание (или планово-предупредительное) – наиболее простая форма превентивности, при которой обслуживание выполняется через установленные календарные интервалы или после выработки определенного ресурса (налет часов, количество циклов, километраж пробега). Эта стратегия основана на статистических данных о средней наработке до отказа однотипных элементов; ее преимущество – простота организации, недостаток – неизбежные избыточные замены исправных компонентов. Обслуживание по состоянию – более совершенная стратегия, при которой решение о проведении ремонта или замены принимается на основании данных, получаемых от встроенных средств контроля или периодических проверок. Ключевым элементом здесь является наличие объективных критериев, позволяющих отличить нормальное состояние от предотказного. Прогностическое обслуживание – высшая форма превентивного подхода, использующая математические модели для предсказания момента наступления отказа на основе анализа динамики изменения параметров. В отличие от обслуживания по состоянию, где оценивается текущее положение, прогностическое обслуживание отвечает на вопрос, когда произойдет отказ, если сохранятся наблюдаемые тенденции.

Превентивная система управления надежностью включает несколько функциональных компонентов. Подсистема сбора данных обеспечивает непрерывное или периодическое получение информации о параметрах работы системы с помощью сети датчиков (температура, давление, вибрация, ток, расход и другие), а также через регистрацию событий и отказов. Подсистема обработки и хранения выполняет первичную фильтрацию данных, удаление шумов, компенсацию дрейфа датчиков и сохраняет историческую информацию, необходимую для анализа трендов. Подсистема анализа и прогнозирования содержит алгоритмы и модели, позволяющие выявлять отклонения от нормального поведения, распознавать паттерны, предшествующие отказам, и оценивать остаточный ресурс компонентов. Подсистема принятия решений на основании прогнозов формирует рекомендации или автоматически инициирует действия: постановку оборудования в ремонт, заказ запасных частей, корректировку режима работы, перераспределение нагрузки. Подсистема обратной связи обеспечивает накопление опыта – сопоставление прогнозов с реально произошедшими отказами, уточнение моделей, корректировку пороговых значений.

Прогностические модели и методы анализа данных. В основе прогностического обслуживания лежат математические модели, описывающие процесс деградации оборудования. Наибольшее распространение получили три класса моделей. Физические модели строятся на основе закономерностей износа, усталости материалов, тепловых и механических процессов. Их преимущество – высокая интерпретируемость, недостаток – сложность построения для реальных систем. Статистические модели используют исторические данные об отказах и параметрах работы для оценки функции распределения наработки до отказа. К этому классу относятся модели пропорциональных рисков, регрессионные модели, модели временных рядов (ARIMA, экспоненциальное сглаживание). Модели машинного обучения включают методы глубокого обучения (рекуррентные нейронные сети, LSTM), ансамблевые методы (случайный лес, градиентный бустинг) и методы обнаружения аномалий (одноклассовый SVM, изолирующий лес). Эти модели позволяют выявлять сложные нелинейные зависимости, но требуют больших объемов данных для обучения.

Ключевым понятием прогностического обслуживания является остаточный полезный ресурс (remaining useful life, RUL) – оценка времени, которое компонент еще может безопасно функционировать до достижения предельного состояния. Методы оценки RUL делятся на подходы, основанные на физических моделях (расчет накопленной усталости), подходы, основанные на данных (экстраполяция тренда, сравнение с историческими кривыми жизни), и гибридные подходы, сочетающие оба принципа. Надежность прогноза RUL зависит от качества данных, глубины истории и стабильности условий эксплуатации.

Организационные аспекты внедрения. Эффективное применение превентивного подхода требует не только технических, но и организационных изменений. В первую очередь необходимо создание системы управления надежностью, включающей регламенты сбора данных, методики анализа, критерии принятия решений и порядок действий при получении прогнозов. Важным элементом является подготовка персонала – инженеры должны уметь интерпретировать прогнозы, отличать достоверные сигналы от ложных срабатываний и принимать обоснованные решения о выводе оборудования в ремонт. Также требуется пересмотр системы складских запасов: вместо хранения широкого ассортимента запасных частей «на случай аварии» внедряется управление запасами на основе прогнозов, что позволяет снизить оборотный капитал. Наконец, необходимо изменение системы мотивации: если при реактивном подходе поощрялась скорость устранения отказов, то при превентивном – точность прогнозов и количество предотвращенных отказов.

Для оценки эффективности превентивных систем используются как традиционные показатели надежности (средняя наработка на отказ, коэффициент готовности), так и дополнительные метрики, отражающие специфику подхода. К таким метрикам относятся: предотвращенные отказы – количество отказов, которых удалось избежать благодаря своевременному вмешательству; точность прогноза – доля правильно предсказанных отказов в общем количестве предсказаний; сокращение времени простоя – разница между временем восстановления при реактивном подходе и временем, затраченным на плановую замену; оптимизация запасов – снижение объема складских запасов за счет перехода от хранения широкой номенклатуры «на случай аварии» к плановому управлению поставками; снижение нагрузки на персонал – уменьшение числа аварийных вызовов, сверхурочных работ и связанных с ними рисков ошибок.

Систематическое применение превентивных стратегий обеспечивает ряд качественных и количественных преимуществ. Во-первых, повышение надежности: замена компонентов на стадии зарождения дефекта предотвращает развитие отказа и исключает вторичные повреждения, которые при реактивном подходе неизбежны. Во-вторых, снижение стоимости жизненного цикла: затраты на плановое обслуживание, выполняемое в оптимальное время, как правило, ниже затрат на аварийный ремонт с учетом простоев, срочных поставок и сверхурочных работ [7]. В-третьих, улучшение планирования: превентивная система позволяет прогнозировать потребность в запасных частях, персонале и оборудовании, что дает возможность выстроить равномерный график работ вместо хаотичной реакции на отказы. В-четвертых, повышение безопасности: в отраслях с высокими требованиями к безопасности (авиация, энергетика, химическая промышленность) превентивный подход является не просто экономически целесообразным, но и обязательным условием эксплуатации. В-пятых, создание базы знаний: превентивные системы накапливают информацию о поведении оборудования в различных режимах, о предвестниках отказов, об эффективности различных методов обслуживания, что становится ценным активом, позволяющим непрерывно улучшать процессы.

Реактивный подход использует в качестве основания для вмешательства возникший отказ, превентивный – прогноз или ранние признаки. При реактивном подходе вмешательство происходит после отказа, система находится в неработоспособном состоянии; при превентивном – до отказа, система работоспособна. Характер работ: аварийный ремонт против планового обслуживания. Сопутствующие повреждения при реактивном подходе значительны, при превентивном – минимальны. Прогнозируемость загрузки персонала низкая при реактивном и высокая при превентивном. Требования к инфраструктуре

минимальны для реактивного подхода и развиты для превентивного. Возможности автоматизации ограничены при реактивном и широки при превентивном.

Реактивный подход оправдан для оборудования с очень высокой надежностью, дешевых компонентов, систем с незначительными последствиями отказов и при невозможности установить контроль [5]. Для критически важных систем превентивный подход является единственно приемлемым.

Для количественной оценки преимуществ превентивного подхода проведен эксперимент на модели промышленной системы из 100 агрегатов. Каждый агрегат включает вращающийся узел (подшипник) с известными закономерностями деградации. Параметры модели: средняя наработка до отказа – 2000 часов; отказ при вибрации >12 мм/с; стоимость часа простоя – 500 у.е.; аварийная замена – 2000 у.е., плановая – 1000 у.е.; трудоемкость аварийной замены – 4 чел.-ч, плановой – 2 чел.-ч. Датчики вибрации передают данные каждые 10 минут. Прогностический алгоритм выдает предупреждение за 50 часов до отказа. Эксперимент проведен в два этапа по 5000 часов: реактивная стратегия (замена после отказа) и превентивная (замена по прогнозу). Фиксировались количество отказов, время простоя, затраты, трудозатраты, число аварийных вызовов.

Таблица 1. Количественные результаты

Показатель	Реактивная	Превентивная	Изменение
Количество отказов (непредвиденных)	187	12	↓ в 15,6 раза
Количество плановых замен	0	168	–
Суммарное время простоя, ч	3740	912	↓ в 4,1 раза
Затраты на ремонт, у.е.	374 000	192 000	↓ в 1,9 раза
Потери от простоев, у.е.	1 870 000	456 000	↓ в 4,1 раза
Общие затраты, у.е.	2 244 000	648 000	↓ в 3,5 раза
Трудозатраты, чел.-ч	748	384	↓ в 1,9 раза
Аварийные вызовы	187	12	↓ в 15,6 раза

Превентивная стратегия обеспечила сокращение числа отказов в 15,6 раза (предотвращено 175 отказов), времени простоя в 4,1 раза (912 против 3740 часов). Простой при плановой замене (4 ч) значительно меньше, чем

при аварийной (20 ч). Общие затраты снизились в 3,5 раза за счет сокращения потерь от простоев и снижения стоимости ремонтов. Трудозатраты сократились почти вдвое, число аварийных вызовов – с 187 до 12, что позволяет персоналу перейти от аварийного реагирования к плановой работе [6; 7].

Качественные эффекты: при реактивной стратегии в 23 % случаев отказ подшипника повреждал сопряженные узлы; при превентивной такие случаи практически отсутствуют. При реактивной стратегии наблюдались «шквалы» отказов (до 15–20 в день), при превентивной работе распределены равномерно. Точность прогноза выросла с 82 % в начале эксперимента до 94 % к концу.

Заключение

Реактивный подход обладает принципиальными ограничениями, становящимися критическими по мере усложнения техники. Превентивный подход, основанный на контроле состояния и прогнозировании, позволяет сократить количество отказов в 15,6 раза, время простоя в 4,1 раза, общие затраты в 3,5 раза, трудозатраты в 1,9 раза. Эффективность превентивного подхода определяется качеством средств контроля, прогностических моделей и способностью системы к накоплению опыта. Переход к превентивному управлению требует первоначальных вложений, но окупается за счет сокращения потерь от простоев. Целесообразен комплексный подход: для критически важных компонентов – превентивное обслуживание с прогнозированием, для менее ответственных – регламентированное, для дешевых и некритичных – реактивная стратегия. Перспективные направления – машинное обучение, цифровые двойники, расширение автоматизации.

Список литературы

1. Беляев Н.М., Соколов А.В. Основы технической диагностики и прогнозирования ресурса оборудования. – М.: Машиностроение, 2021. – 312 с.
2. Гринченко В.Т., Макаров В.Л. Надежность технических систем: от реактивного к превентивному управлению. – СПб.: Политехника, 2023. – 288 с.
3. Лебедев В.П., Михайлов А.С. Методы и системы прогнозирования отказов сложных технических объектов. // Надежность и качество сложных систем, 2023, № 2, с. 42–51.
4. Новиков В.А., Федоров И.С. Сравнительный анализ стратегий технического обслуживания и ремонта. – Новосибирск: Наука, 2024. – 204 с.
5. Фролов Ю.Г., Шишкин А.В. Техническая эксплуатация и надежность: от теории к практике. – М.: Инфра-М, 2023. – 340 с.
6. Дорохов А.Н., Козырев Ю.Г. Промышленный интернет вещей и предиктивная аналитика в управлении оборудованием. // Автоматизация в промышленности, 2024, № 3, с. 17–24.
7. Черепанов В.С. Экономика эксплуатации промышленного оборудования. – М.: Экономика, 2024. – 192 с.
8. Ширяев В.И., Баженов А.А. Прогнозирование технического состояния сложных систем. – М.: Физматлит, 2023. – 256 с.

УДК. 629.7.08

ЕВДОКИМОВ С.К., АБДУЛЛИН И.Н.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ САМОЛЁТА ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

***Аннотация:** Проблема обледенения в современной авиации представляет собой большую угрозу безопасности полётов. Именно поэтому уже внедрены и продолжают разрабатываться многие прогрессивные методы борьбы с образованием льда на поверхностях самолёта. В статье рассмотрены основные противообледенительные системы (ПОС) летательного аппарата (ЛА), их преимущества и недостатки. Также приведены перспективы развития этого направления.*

***Ключевые слова:** Обледенение, методы борьбы, гидрофобные покрытия, химические методы, перспективы.*

Введение

Обледенение воздушных судов остаётся одним из ключевых факторов риска в авиации, вызванным образованием ледяного покрова или плёнки на обтекаемых поверхностях воздушного судна, его силовых установках и других внешних деталях.

К негативным факторам обледенения относят ухудшение аэродинамического качества самолёта, увеличение его веса, возможный выход из строя различных датчиков и заклинение органов управления и механизации. [1]

Современные технологии защиты от льда сочетают проверенные методы с инновационными решениями, обеспечивая безопасность полётов даже в сложных метеоусловиях.

Основные методы борьбы с обледенением

1. Механические методы

Механические методы основаны на физическом разрушении и удалении льда. К ним относятся пневматические и вибрационные противообледенительные системы. [3]

Пневматические

Принцип: на критических поверхностях (передние кромки крыльев, стабилизаторов) устанавливаются резиновые протекторы. При включении в них подаётся сжатый воздух – протекторы «надуваются», лёд трескается и уносится потоком воздуха.

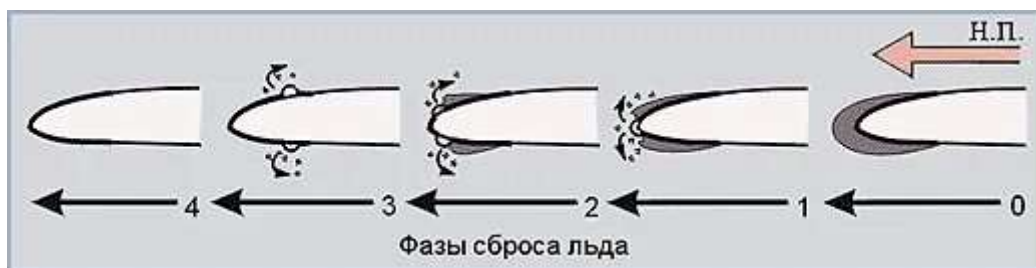


Рисунок 1 – Действие пневматической ПОС [2]

Вибрационные

Создаются высокочастотные колебания, препятствующие адгезии льда к поверхности.

Преимущества:

- простота;
- надёжность;
- отсутствие расхода реагентов.

Недостатки:

- не предотвращают обледенение, только удаляют уже образовавшийся лёд;
- негативное влияние вибраций на рядом расположенные элементы.

2. Тепловые методы.

Основаны на нагреве поверхности до температуры выше точки замерзания. [3]



Рисунок 2 – Электрообогрев кромки крыла (оперения) [3]

На элементы, подверженные обледенению (приёмники воздушного давления, лобовые стёкла, датчики) устанавливаются нагревательные элементы. Питание – от бортовой электросети.

Во многие современные самолёты внедрена система электрообогрева с интеллектуальным управлением, которая обладает следующими особенностями:

- зональный обогрев – нагрев только критических участков;
- динамическая регулировка мощности в зависимости от интенсивности обледенения; [4]
- интеграция с системой управления полётом.

Воздушный обогрев

Горячий воздух отбирается от компрессоров двигателей и направляется по каналам внутри передних кромок крыльев и воздухозаборников.

Радиочастотный нагрев

Экспериментальный метод: электромагнитные волны проникают в лёд, нагревая его изнутри. [2]

3. Электроимпульсные системы

Новейшее направление в борьбе с обледенением. Принцип работы:

- генерируются кратковременные мощные импульсы тока;
- возникают локальные деформации обшивки;
- лёд трескается и сдувается набегающим потоком воздуха.

4. Химические методы

Принцип: снижение точки замерзания воды с помощью реагентов.



Рисунок 3 – Противообледенительная обработка самолёта [3]

Обработка самолёта противообледенительными жидкостями (ПОЖ) производится на земле непосредственно перед полётом. Различают:

- тип I – маловязкие, для удаления льда (оранжевые);
- тип II – с загустителем, создают защитный слой (жёлтые);
- тип III – для медленных самолётов (зелёные);
- тип IV – максимальная защита для реактивных лайнеров (зелёные).

Может быть использован впрыск гликоля/спирта в зону воздухозаборника. [2] Используется на некоторых турбовинтовых самолётах.

Преимущества:

- надёжная защита на этапе взлёта;
- гибкость применения.

Недостатки:

- ограниченный срок действия (от 15 минут до 2 часов);
- экологическая нагрузка (гликоли токсичны для водоёмов).

5. Пассивные методы (гидрофобные покрытия)

Принцип: уменьшение адгезии льда за счёт сверхгладких или водоотталкивающих поверхностей.

Комбинированные системы

На современных самолётах для достижения наилучшей защиты от обледенения используется сочетание различных противообледенительных систем. [3]

Перспективы развития

Ближайшие направления совершенствования:

- полная интеграция противообледенительных систем в «умную» архитектуру самолёта;
- разработка энергоэффективных нанопокровов; [4]
- создание универсальных составов ПОЖ с длительным сроком действия;
- внедрение автономных роботизированных систем обработки на земле. [4]

Заключение

Современные способы защиты от обледенения представляют собой многоуровневые системы, сочетающие традиционные методы с передовыми технологиями. [1] Ключевыми тенденциями являются:

- повышение энергоэффективности;
- экологичность решений;
- автоматизация процессов;
- интеллектуальное управление.

Несмотря на прогресс технологий, важнейшую роль продолжает играть профессионализм персонала – от наземных служб до экипажа. Комплексный подход, включающий технические инновации и человеческий разум, обеспечивает максимальную безопасность полётов в условиях риска обледенения.

Список литературы

1. Противообледенительная система. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Противообледенительная_система (дата обращения: 09.03.2026).
2. Любченко О. И., Вишнев А. В., Акзигитов Р. А. Способы устранения обледенения и выполнения противообледенения воздушного судна // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. С. 201-203.

3. Миляев К. Е., Семенов С. В., Балакирев А. А. Обзор способов борьбы с обледенением в авиационных двигателях // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 59. С. 5-19.

4. Обледенение (авиация) URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Обледенение_\(авиация\)](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Обледенение_(авиация)) (дата обращения: 09.03.2026).

УДК 629.7.054.07

ЕВСЕВИЧЕВ Д.А., ШАРАПОВ Н.В.

Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОЦЕДУРНОГО ТРЕНАЖЕРА ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА

***Аннотация.** В статье рассматривается подход к проектированию процедурных тренажеров различных авиационных систем, устанавливаемых на борту воздушного судна. На основе представленного подхода был разработан программный продукт, позволяющий осуществлять подготовку летного состава к выполнению возложенных на него функций. Предлагаемое решение видится актуальным в условиях постоянного развития бортового оборудования.*

***Ключевые слова:** тренажер, подготовка, лётный состав, лётная эксплуатация*

Современная подготовка специалистов авиационного персонала, и лётного состава в частности, является сложной комплексной задачей. Приобретение компетенций, расширение знаний, умений, навыков касается не только будущих пилотов, обучающихся в специализированных учебных заведениях, но и действующих пилотов, проходящих переобучение на новые виды воздушных судов, повышение квалификации, продлевающих действие лётного свидетельства и др.

Согласно современному подходу, принятому Федеральным агентством воздушного транспорта «Росавиация», подготовка должна включать не только получение теоретических знаний, но и приобретение практических навыков лётной эксплуатации оборудования, с которым будет работать пилот. Такой подход описывается в документах ICAO Doc 9868 «Правила аэронавигационного обслуживания. Подготовка персонала», где описывается концепция СВТ – Competency Based Training [1], и Doc 9995 «Руководство по подготовке персонала на основе анализа фактических данных», где описывается концепция ЕВТ – Evidence Based Training [2]. Описываемое в документах освоение компетенций включающее приобретение практических навыков по взаимодействию с бортовым оборудованием, может быть реализовано при работе с комплексным тренажером соответствующего воздушного судна, однако

дополнение навыков работы с соответствующими процедурными тренажерами позволит повысить качество обучения.

Основной проблемой в использовании процедурных тренажеров на всех этапах освоения оборудования воздушного судна является многообразие возможных систем, имеющих порой сильно отличающиеся функции. Современные производители авионики иногда создают тренажеры для своих систем, однако этого нельзя сказать обо всех компаниях и это не касается устаревшего оборудования, которое тем не менее является актуальным на используемых отечественных судах. Поэтому создание тренажера для каждой отдельной системы является непростой и дорогой задачей.

Для решения представленной проблемы была предложена и реализована концепция универсального проектирования процедурных тренажеров, позволяющая пользователю, не обладающему навыками программирования, реализовать необходимые тренажеры с использованием технологии drag-and-drop, то есть оперируя отдельными функциональными блоками. Основная цель при этом – проектирование тренажера для проведения исследования устройства, организации тренажерной практики и контроля качества обучения.

Универсальный подход к проектированию процедурных тренажеров должен включать выбор типа, конструкции, размеров проектируемого устройства, выбор компонентов (элементов индикации и управления) и их свойств. Для описания этого подхода была составлена математическая модель тренажера, которая может быть описана формулой:

$$S = (DS, B, I, C, Fx). \quad (1)$$

где DS – множество проектных решений;

B – множество типов устройств, представляющее собой пополняемую базу данных, включающую идентификаторы устройств, их изображение и размеры;

I – множество элементов индикации с хранящимися в базе данных идентификаторами, типами, параметрами дисплеев и бинарных индикаторов, а также путями взаимодействия с множеством C ;

C – множество элементов управления с аналогично хранящимися в базе данных множествами элементов кнопок, тумблеров и ручек управления с соответствующими параметрами управления.

Fx – множество интерпретирующих функций отношений между множествами B, I, C .

Для дальнейшего представления математического описания поставленной задачи проектирования процедурного тренажера был использован метод селективного структурного синтеза, в основу которого легло морфологическое И-ИЛИ дерево (рис. 1) [3].

Вершины дерева включают элементы множеств, описанных в формуле (1). Ребра типа «И» обозначаются сплошной линией и указывают

на компоненты, обязательно включаемые в проект, ребра типа «ИЛИ» обозначаются пунктирной линией и указывают на компоненты, которые выбираются из предложенного множества для включения в проектное решение.

Селективный структурный синтез включает поиск проектного решения с учётом установленных ограничений конфигурации на этапе описания технического задания и правил выбора ребер морфологического дерева. Поставленная в рамках работы задача проектирования процедурных тренажеров подразумевает составление решения на основе уже существующего, а значит не требует решение задачи оптимизации.

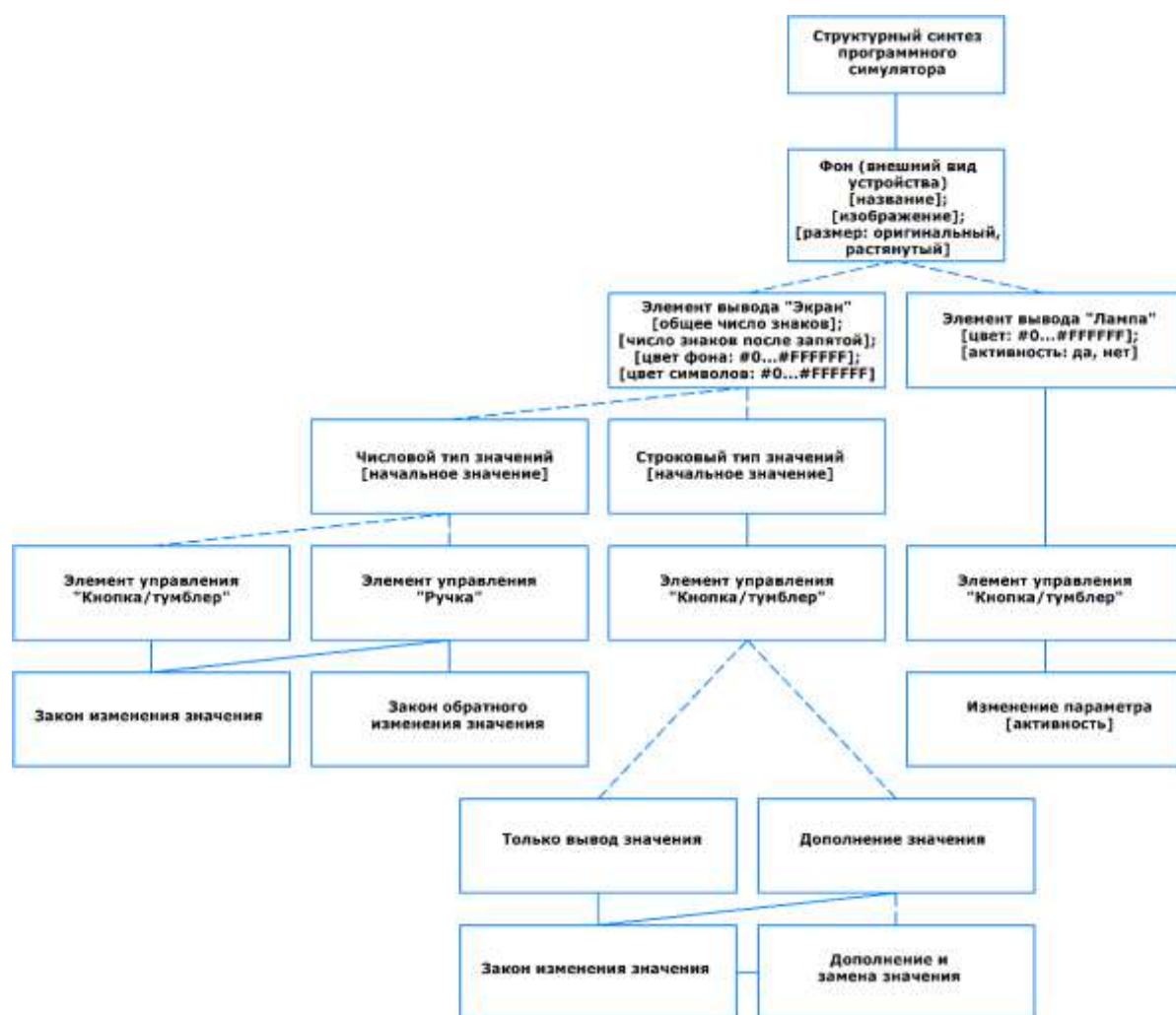


Рисунок 1 – Морфологическое И–ИЛИ-дерево селективного синтеза процедурных тренажеров авиационного оборудования

На основе описанного математического аппарата был составлен алгоритм работы программы, представленный на рис. 2.

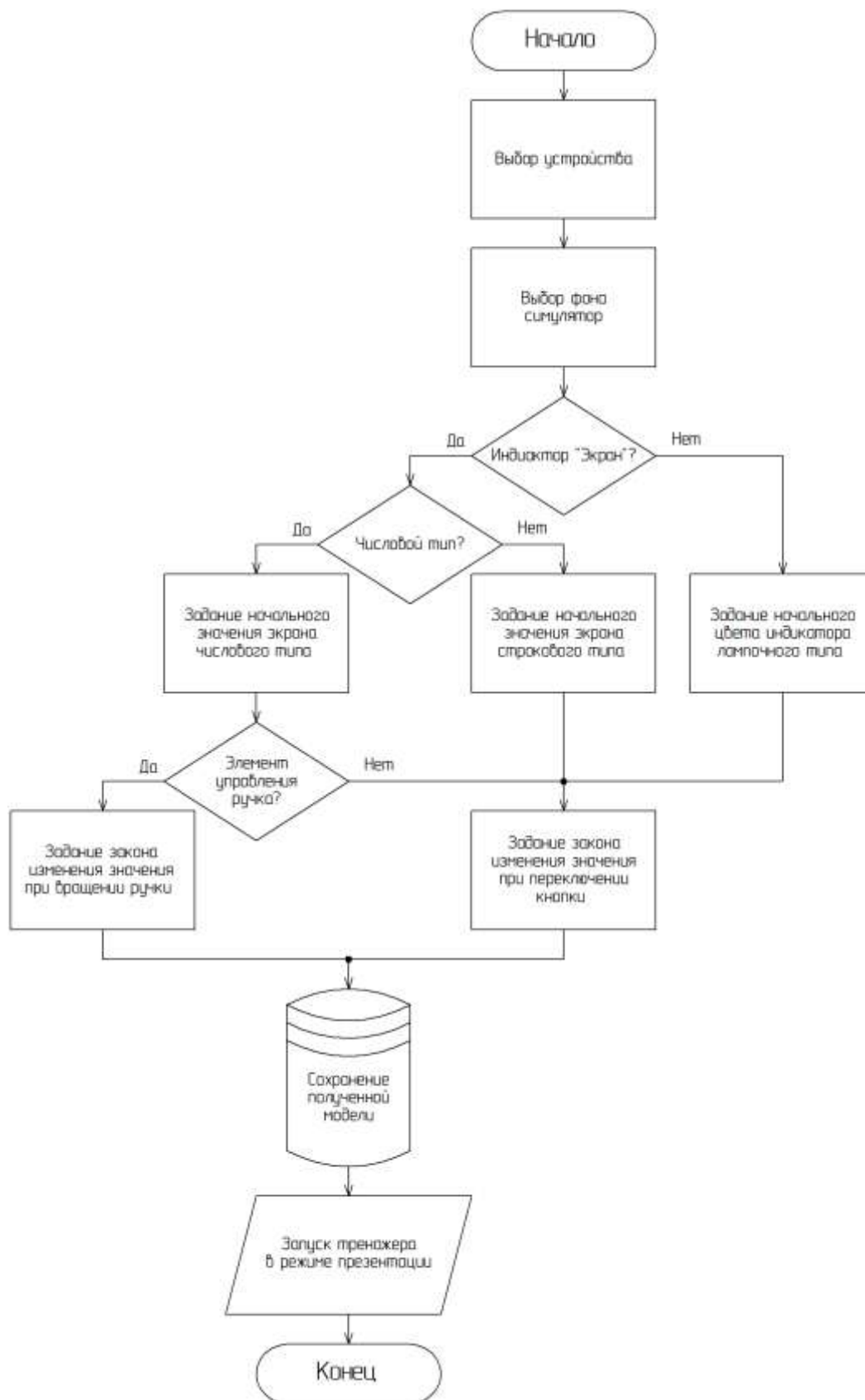


Рисунок 2 – Алгоритм универсального проектирования процедурных тренажеров авиационного оборудования

Представленный алгоритм стал основой для разработки программы проектирования процедурных тренажеров авиационного оборудования. Продукт представляет собой прикладное программное обеспечение, запускаемое из операционной системы Windows (рис. 3). Программа написана на строго типизированном объектно-ориентированном языке программирования Java.



Рисунок 3 – Интерфейс программы универсального проектирования процедурных тренажеров авиационного оборудования в режиме редактирования

При запуске программы будет представлен ее интерфейс, включающий три вкладки, в которых осуществляется проектирование элементов, описанных множествами в формуле (1): выбор фона, выбор элементов вывода и выбор элементов управления. В программе реализованы зоны управления проектом для редактирования, выбора настроек, сохранения и загрузки проектов, а также включения режима демонстрации. Кроме того, здесь присутствует зона визуального отображения устройства, используемая как на этапе проектирования процедурного тренажера, так и на этапе демонстрации его работы.

В режиме редактирования определяются связи между элементами управления и индикации, задаются соответствующие законы изменения выходных сигналов, определяются области взаимодействия и отображения элементов.

Все составленные элементы и связи между ними сохраняются в базу данных.

В режиме редактирования проекта области элементов вывода и управления являются видимыми и специально подсвеченными, в режиме демонстрации же фон элементов обесцвечивается, элементы индикации обрезаются.

Разработанный программный продукт является простым, свободно распространяемым средством реализации процедурных тренажеров, необходимых во время ознакомления с летной эксплуатацией нового бортового оборудования. Система может найти своё применение в учебных заведениях гражданской авиации.

Список литературы

1. Дос 9868. Правила аэронавигационного обслуживания. Подготовка персонала. – ICAO. – 2016. – 254 с.
2. Дос 9995 Руководство по подготовке персонала на основе анализа фактических данных. – ICAO. – 2013. – 170 с.
3. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования [Текст] : учеб. для вузов / И.П. Норенков. – М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.

УДК 678.067

ИБРАГИМОВ М.Р., УСМОНОВ Р. С., БАТРАКОВ В.В.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПРЕФОРМ С ТРИАКСИАЛЬНОЙ СХЕМОЙ АРМИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА

***Аннотация.** В работе представлена методика проектирования и формирования преформ трубчатого типа с триаксиальной схемой армирования, получаемых методом радиального плетения на оправках переменного диаметра. Предложен алгоритм расчёта скорости подачи оправки и траектории движения с обеспечением заданного угла армирования.*

***Ключевые слова:** радиальное плетение, триаксиальная преформа, переменный диаметр, угол армирования, композиционные материалы.*

Технология радиального плетения является одним из наиболее эффективных способов получения армирующих преформ трубчатого типа для изделий авиационно-космического назначения [1]. Особый интерес представляет формирование преформ с триаксиальной схемой армирования ($\pm\phi/0^\circ$), обеспечивающих повышенную жёсткость, устойчивость к крутящим нагрузкам и улучшенные эксплуатационные характеристики. Однако при изготовлении изделий переменного диаметра возникают существенные технологические сложности, связанные с изменением кинематики процесса и нарушением равномерности структуры армирования.

Основной проблемой является обеспечение постоянства заданного угла армирования при изменении диаметра оправки вдоль оси изделия. В

условиях радиального плетения угол армирования α определяется соотношением между окружной скоростью перемещения нитей и скоростью подачи оправки. Для цилиндрического участка это соотношение может быть представлено в виде (1):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\omega R}{V_m}\right) \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения веретен, рад/с; R – радиус технологической оправки, мм; V_m – скорость подачи технологической оправки, мм/с.

При переменном диаметре угол армирования α_i определяется как (2):

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{\omega R_i}{V_{mi}}\right) \quad (2)$$

где i – номер сечения, образованного плоскостью, перпендикулярной оси вращения технологической оправки.

Для триаксиальной схемы армирования дополнительно учитывается наличие осевого компонента (0°), формируемого за счёт подачи продольных нитей.

Для корректного формирования преформы на поверхности оплетаемого сечения необходимо учитывать ряд факторов:

- степень покрытия;
- соотношение количества армирующего материала в косом и осевом направлениях;
- натяжение армирующего материала в осевом и косом направлениях;
- величина радиальной составляющей натяжения нитей в осевом и косом направлениях;
- точка осаждения преформы [2].

Также при формировании преформы с переменным сечением по длине важно определение приоритета между $\alpha = const$ и $t = const$ (где t – толщина монослоя преформы). Для обеспечения постоянства толщины преформы по длине ($t = const$) необходимо изменение угла армирования для обеспечения постоянной поверхностной массы по длине. При обеспечении постоянства угла армирования ($\alpha = const$) толщина преформы изменяется градиентным образом по длине изделия.

Методика включает следующие этапы:

1. Анализ геометрии оправки и определение функции изменения диаметра $D(z)$;
2. Задание закона изменения угла армирования (постоянный или переменный);
3. Расчёт локальной скорости подачи оправки;
4. Формирование траектории движения оправки в пространстве с учётом её кривизны и ориентации;

5. Определение распределения нитей по поверхности сечения с использованием эквивалентного периметра;

6. Расчет натяжения нити в косом и осевом направлении;

7. Написание управляющей программы для обеспечения условия ортогональности единичного вектора к плоскости осаждения преформы;

8. Учет деформации монослоя преформы при создании многослойной преформы методом радиального плетения.

Разработанная методика позволяет учитывать перераспределение армирующего материала и прогнозировать локальные изменения плотности укладки, точно прогнозировать конечные геометрические параметры изделия, изготовленного методами трансферного формования.

Верификация методики проводилась путём сопоставления расчётных значений угла армирования с экспериментальными данными, полученными с использованием систем технического зрения. Погрешность не превышала 5 %, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Результаты работы могут быть использованы при разработке технологий изготовления композитных конструкций сложной геометрии, в том числе элементов авиационной и космической техники.

Список литературы

1. Van Ravenhorst J. Design tool for circular braiding of complex mandrels. 2018.
2. Chi H. et al. Tool path planning for robotic braiding of complex preforms. 2021.

УДК 629.735.33:621.565.83

**ЛАВРИНОВИЧ Р. С., МОЛОКОВА С. В., ПЕРШУКОВ В. В.,
ШЕВЧЕНКО Е. М.**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ДРОНОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ: ОБЗОР МЕТОДОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СИСТЕМ

***Аннотация.** Рассмотрены проблемы эксплуатации БПЛА при температурах выше +40°C и ниже –20°C [1]. Проведён анализ методов терморегулирования, предложена авторская классификация по источнику энергии и месту воздействия. Сформулированы критерии выбора метода в зависимости от климатической зоны. Обоснована необходимость создания комплексной системы, объединяющей нагрев и охлаждение с интеллектуальным управлением.*

***Ключевые слова:** БПЛА, терморегулирование, экстремальные температуры, аккумуляторы, охлаждение, подогрев, интеллектуальная система управления.*

БПЛА всё шире применяются в экстремальных температурных условиях, но большинство серийных дронов рассчитаны на диапазон – 10...+40°C [2]. При выходе за эти пределы возникают перегрев электроники, потеря ёмкости батарей, риск деградации аккумуляторов [2,3]. Существующие технические решения не образуют единой методологии защиты [5,6].

Цель работы: разработка концептуальной модели гибридной интеллектуальной системы терморегулирования БПЛА вне рабочего диапазона температур.

Необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ влияния температуры на компоненты БПЛА.
2. Систематизация существующих методов терморегулирования.
3. Классификация методов.
4. Выявление перспективных направлений для гибридных систем.

Рассмотрим основные проблемы, возникающие при эксплуатации БПЛА в условиях экстремальных температур.

В жарком климате внутренняя температура корпуса может превышать внешнюю на 10–20°C из-за тепловыделения двигателей (до 80°C), ESC и аккумуляторов. При охлаждении до –20°C и ниже возникают: рост внутреннего сопротивления, замедление диффузии ионов лития, снижение скорости реакций [3]. Разрядная ёмкость падает на 30–50%, а заряд на холоде приводит к литиевому plating и риску КЗ [1,3] (рис. 1).

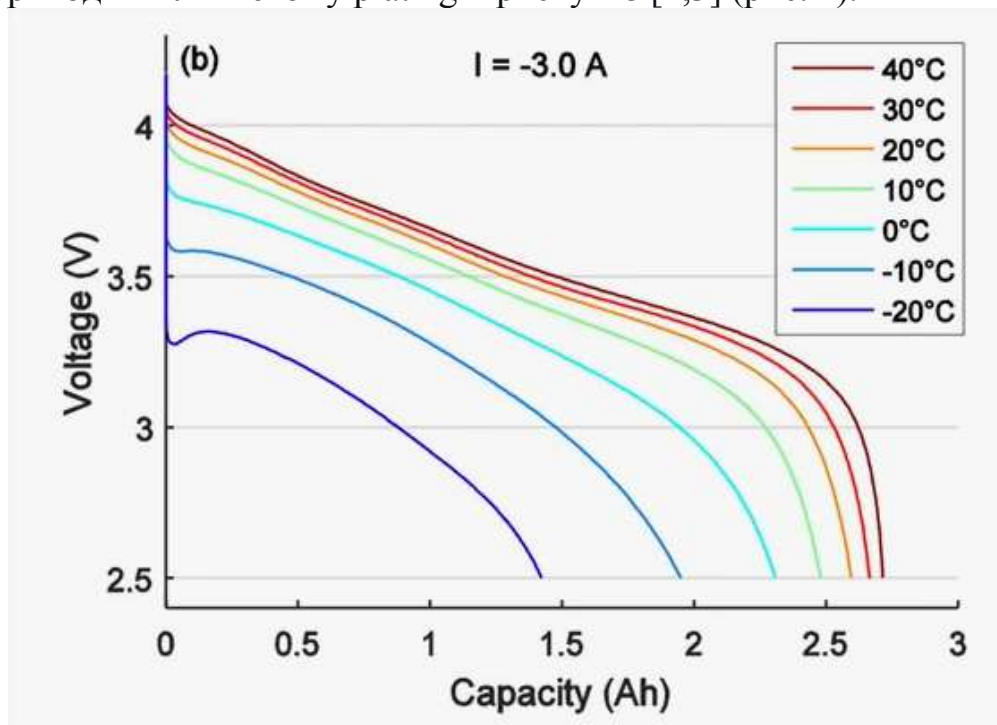


Рисунок 1 – Разрядные характеристики литий-ионного аккумулятора при различных температурах (ток разряда 3,0 А)

Основные негативные эффекты и их последствия, возникающие в БПЛА при негативных температурных воздействиях также представлены в таблице 2.

Таким образом, температурный диапазон стабильной работы большинства БПЛА ограничен $-20...+40^{\circ}\text{C}$, что требует активного терморегулирования за его пределами.

Таблица 2 – Негативные результаты воздействия экстремальных температур

Компонент	Эффекты и последствия	
	выше 45°C	ниже -20°C
Аккумуляторы (LiPo/Li-ion):	– ускоряются химические реакции – падает напряжение под нагрузкой – сокращается ресурс	– рост внутреннего сопротивления (в 3–5 раз) – замедление диффузии ионов лития – падение разрядной ёмкости на 30–50% – невозможность заряда (риск литиевого plating и внутреннего КЗ).
ESC и двигатели	– увеличиваются сопротивления транзисторов – снижается эффективность магнитной системы – уменьшается тяга.	– увеличение сопротивления открытых каналов MOSFET ($R_{ds(on)}$) – изменение ёмкости конденсаторов – Дрейф параметров микроконтроллера и кварцевого резонатора – проблемы с запуском и инициализацией – сбои синхронизации на высоких оборотах, – «залипание» двигателя, резкие броски тока, отключение ESC по перегрузке и др.
Полётный контроллер и MEMS-датчики	– температурный дрейф гироскопов и акселерометров – нестабильность полёта.	– низкотемпературный дрейф
Конструкционные пластики	– размягчение при $>60^{\circ}\text{C}$, снижение прочности углепластикового связующего.	– пластик охрупчивается.

Также проведен анализ существующих способов терморегулирования. Предлагается разделять методы по двум критериям: по целевому воздействию на охлаждение и нагрев, а по источнику энергии на пассивные, активные и встроенные в компонент.

В таблице 2 представлены результаты систематизации всех существующих методов терморегулирования БПЛА.

Таблица 2 – Классификация методов терморегулирования БПЛА

Цель	Тип	Метод	Примеры	Эффективность	Ограничения
Охлаждение	Пассивное	Естественная конвекция, радиаторы	Алюминиевые радиаторы на ESC	$\Delta T = 5-15^{\circ}\text{C}$	Неэффективен при $>45^{\circ}\text{C}$
	Активное	Принудительное воздушное охлаждение	Мини-вентиляторы	$\Delta T = 15-20^{\circ}\text{C}$	Масса, энергопотребление (1–5 Вт)
	Конструктивное	Компоновка в зоне набегающего потока	ESC у вентиляционных щелей	$\Delta T = 5-10^{\circ}\text{C}$	Требуется перепроектирования
Нагрев	Активный (внешний)	Тонкопленочные нагреватели	Полиимидные нагреватели	КПД до 97%	Энергозатраты
	Активный (встроенный)	Самонагревающийся аккумулятор	Центральный стержень	$25,5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, затраты 6,27% SOC	Требуется переработки ячейки
	Утилизационный	Использование тепла светодиодов	Концепция СПБГУАП	$+8...+12^{\circ}\text{C}$ при -15°C	Требуется включённого освещения
	Инфраструктурный	Наземные воздушные нагреватели	Установка UNISTEAM	Быстрый прогрев планера	Требуется наземного питания

Проведем анализ эффективности методов терморегулирования для разных климатических зон.

1. В условиях экстремальной жары ($>45^{\circ}\text{C}$) пассивное охлаждение перестает работать из-за малого перепада температур. При этом активное охлаждение, которое осуществляется посредством вентиляторов эффективно, но недостаточно. Поэтому возникает необходимость в использовании следующего комплекса мероприятий:

- принудительный обдув ESC и аккумулятора. Для этого можно использовать вентилятор с ШИМ-управлением;
- при длительной эксплуатации – замена стандартных ESC на промышленные, которые имеют рабочий диапазон до $+85^{\circ}\text{C}$.

2. В условиях экстремального холода ($\leq -30^{\circ}\text{C}$) основной проблемой является запуск и поддержание работоспособности аккумулятора. Предлагается использование следующих технических решений:

- обязательное использование самонагревающиеся аккумуляторов (с внутренним стержнем) или встроенных РТС-нагревателей;
- теплоизоляция аккумуляторного отсека с использованием доступных теплоизоляторов: пенополиуретан, аэрогель толщиной 5–10 мм);
- замена штатной смазки подшипников на низкотемпературную;
- предполётный прогрев дрона в термосумке или с помощью наземного нагревателя.

Проведенный анализ методов терморегулирования показал, что ни один из существующих методов не работает в обоих режимах (жара+холод) без перестройки. Поэтому научная новизна данного анализа заключается в постановке задачи создания комплексной интеллектуальной системы терморегулирования, которая может включать:

- блок пассивного охлаждения (радиатор) + вентилятор с реверсивным режимом (для обдува или вытяжки).
- тонкопленочный нагреватель на аккумуляторе и ESC.
- микроконтроллер с обратной связью по термодатчикам (это может быть DS18B20 или NTC).
- алгоритм адаптивного управления: при $T < 0^{\circ}\text{C}$ необходимо обеспечить включение нагрева до $+10^{\circ}\text{C}$, а при $T > 45^{\circ}\text{C}$ – включение вентилятора; при выключенном двигателе – поддержание аккумулятора в диапазоне $0...+30^{\circ}\text{C}$.
- питание системы осуществлять от основной батареи с приоритетом на нагрев при низких температурах.

Предварительные расчёты: система массой 50–80 г расширяет диапазон дрона массой 2 кг с $-20...+40^{\circ}\text{C}$ до $-40...+55^{\circ}\text{C}$ при снижении времени полёта не более 12%.

К наиболее перспективным инновационным технологиям заслуживающим особого внимания следует отнести:

1. Микро-ТОТЭ (твердооксидные топливные элементы, Япония, 2026) – энергоплотность в 4 раза выше Li-ion, выход на режим 5 мин. Рабочая температура 600°C требует сложной теплоизоляции. Применимы для стратегических БПЛА.

2. Химические электролиты (МФТИ, сульфоксидная добавка) – работоспособность литий-фторуглеродных батарей от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$ без внешнего подогрева. Требуют доведения до серийного производства.

Выводы и рекомендации

- Эксплуатация БПЛА ниже -20°C и выше $+40^{\circ}\text{C}$ невозможна без терморегулирования.
- Предложенная классификация позволяет выбирать метод под климатическую зону и тип дрона.
- Наиболее эффективен комплексный подход:
 - для жары: активное охлаждение + термостойкие компоненты + оптимизация энергопотребления;
 - для холода: самонагревающиеся аккумуляторы + теплоизоляция.
- Перспективны интеллектуальные гибридные системы с адаптивным управлением.
- Дальнейшие исследования: экспериментальные энергозатраты, модули Пельтье, машинное обучение для прогноза теплового состояния.

Список литературы

1. Тепловое управление нагрузкой беспилотных летательных аппаратов: механизмы, системы и применение // Дроны. – 2025. – Т. 9, № 5. – С. 350. DOI: 10.3390/drones9050350.
2. Вальдманн Т., Вилька М., Каспер М., Фляйшхаммер М., Вольфарт-Меренс М. Температурно-зависимые механизмы старения литий-ионных аккумуляторов – постмортемное исследование // Журнал источников тока. – 2014. – Т. 262. – С. 129–135. DOI: 10.1016/j.jrowsour.2014.03.112.
3. Пэн Х., Чэнь Ш., Гарг А., Бао Н., Панда Б.Н. Обзор методов оценки и нагрева литий-ионных аккумуляторов в холодных условиях // Энергетическая наука и техника. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 645–662. DOI: 10.1002/ese3.309.
4. Линь Ц., Конг В., Тянь Ю., Ван В., Чжао М. Нагрев литий-ионных аккумуляторов при низких температурах для бортовых применений: современное состояние, проблемы и перспективы // Автомобильные инновации. – 2022. – Т. 5, № 1. – С. 3–17. DOI: 10.1007/s42154-021-00168-4.
5. Сюн Л., Чэнь П., Чэнь Ю., Хань Ф., Чжан Ц., Лю Х. Всесторонний обзор стратегий терморегулирования цилиндрических литий-ионных аккумуляторных батарей // Материалы для хранения энергии. – 2022. – Т. 48. – С. 164–186. DOI: 10.1016/j.ensm.2021.06.008.

УДК 621.983.07

ПАРФЕНОВ Д. А., КОНСТАНТИНОВ Д. Ю.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРЕССОВОГО ФОРМОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛАСТИЧНОГО ПУАНСОНА С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

***Аннотация.** Рассмотрены методы повышения теплопроводности оснастки при изготовлении высококачественных изделий из полимерных композитных материалов (ПКМ) методом прессового формования. Представлены практические примеры используемых способов повышения теплопроводности в авиастроении.*

***Ключевые слова:** теплопроводность, композитные материалы, авиастроение, прессовое формование.*

Производство высококачественных изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) для авиастроения требует эффективных и экономичных методов формования [1]. Автоклавный метод, обеспечивающий высокое качество, имеет значительные эксплуатационные расходы, что ограничивает его использование. Альтернативный метод прессового формования с эластичным пуансоном позволяет снизить требования к точности оснастки и равномерно распределять давление, но его ключевым недостатком является низкая теплопроводность эластичного материала (силикона), приводящая к неравномерному прогреву и дефектам изделий рис.1 [2].

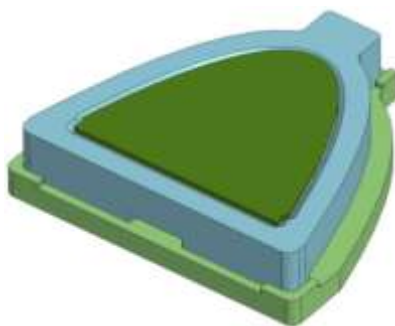


Рисунок 1 – Математические модели оснастки с деталью из ПКМ и пуансоном

Для решения проблемы были проведены численные расчеты в среде ANSYS, моделирующие нагрев и распределение давлений для пяти типов пуансонов: из чистого силикона, из силикона с добавлением алюминиевого

порошка (10 %, 20 %, 30 % по массе) и гибридного пуансона с монолитным алюминиевым сердечником рис. 2 [3].

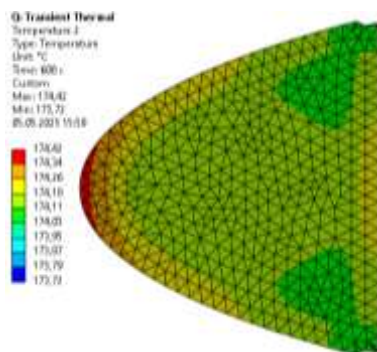


Рисунок 2 – Эпюра распределения температурного поля в пуансоне

Результаты моделирования верифицированы экспериментально, путем изготовления опытных образцов оснастки и формования тестовых композитных панелей (углепластик с сотовым наполнителем) с контролем температурных полей [4; 5]. Установлено, что модификация силикона алюминиевым порошком (до 30%) незначительно повышает теплопроводность, но существенно снижает эластичность материала [6]. Наиболее эффективным решением является гибридная конструкция: тонкий слой силикона, обеспечивающий равномерную передачу давления, и массивный алюминиевый сердечник, выступающий в роли высокоэффективного теплопроводящего элемента рис. 3 [7].



Рисунок 3 – Гибридный пуансон

Экспериментально подтверждено, что при использовании гибридного пуансона выравнивание температуры по толщине пакета происходит за 7 минут, тогда как для пуансонов с наполнителем для этого требовалось от 14 до 18 минут. Разработанная оснастка успешно выдержала 15 циклов термоциклирования (от 40 до 190°C) без потери геометрии и свойств [8].

Практическая значимость и экономический эффект. Предложенная конструкция гибридного пуансона позволяет: 1. Сократить время технологического цикла за счет более быстрого и равномерного прогрева оснастки. 2. Повысить качество изделий за счет равномерной

полимеризации и минимизации внутренних напряжений. 3. Обеспечить приемлемую стоимость оснастки в пересчете на один комплект изделий [9; 10].

Разработанная конструкция гибридного эластичного пуансона с алюминиевым сердечником эффективно решает проблему низкой теплопроводности традиционных эластичных пуансонов, совмещая их технологические преимущества с высокими тепловыми характеристиками металла. Данная технология рекомендуется к внедрению для повышения эффективности и качества производства композитных деталей.

Список литературы

1. Kablov, E. N. Aviation materials science: results and prospects / E. N. Kablov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2020, vol. 90, No. 4, pp. 331-337.
2. Silicone elastomers for technological equipment / I. O. Fedorov, P. A. Belov, K. N. Smirnov, E. V. Novikova. Moscow : Khimiya Publ., 2020, 208 p.
3. Varganov, V. P. Numerical modeling of thermoforming processes of composite panels / V. P. Varganov, M. A. Semenov // Engineering Journal: Science and Innovation. - 2020. – No. 11. – pp. 1-12.
4. Халиулин, В. И. Технология производства изделий из полимерных композиционных материалов : учебное пособие / В. И. Халиулин. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2019. – 144 с.
5. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : НОТ, 2018. – 820 с.
6. Алымов, М. И. Теплопроводность полимерных композиционных материалов / М. И. Алымов, В. И. Зеленский, А. Б. Кузьмин // Материаловедение. – 2021. – № 5. – С. 34–40.
7. Зайцев, С. В. Гибридные методы формования деталей из полимерных композиционных материалов / С. В. Зайцев, Д. А. Козлов // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30817> (дата обращения: 29.03.2026).
8. Бабич, Д. В. Моделирование технологических процессов формования деталей из полимерных композиционных материалов / Д. В. Бабич, А. П. Петров, С. А. Лукин // Авиационная промышленность. – 2021. – № 2. – С. 45–52.
9. Чурсова, Л. В. Полимерные композиционные материалы в конструкциях авиакосмической техники / Л. В. Чурсова, Т. А. Гусева, Н. Н. Паничева, Ю. Г. Кузнецова // Труды ВИАМ. – 2020. – № 7 (89). – С. 3–11.
10. Эластичные пуансоны для прессования композитных материалов / А. М. Осипов, Ю. А. Лапин, В. В. Соловьев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 12. – С. 21–26.

УДК 629.735.45

ПЕТРОВ И.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРДАННОГО ВАЛА ВЕРТОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

***Аннотация.** В статье исследуется технология изготовления карданного вала вертолета из полимерных композиционных материалов. Выделены преимущества углепластиковой конструкции перед металлическими аналогами. Описаны метод радиального плетения сухой преформы и процесс вакуумной инфузии эпоксидным связующим; приведены результаты прочностного и модального анализа. Предложенная технология позволяет снизить массу вала примерно на 40–60 % при обеспечении требуемых прочностных и динамических характеристик.*

***Ключевые слова:** карданный вал вертолета, композиционные материалы, углепластик, радиальное плетение, вакуумная инфузия, прочностной расчет, собственные частоты.*

Современное вертолетостроение предъявляет жесткие требования к элементам трансмиссии, прежде всего к карданным валам. Они должны обладать высокой прочностью и жесткостью при минимальной массе, выдерживать значительные циклические и ударные нагрузки, работать в широком диапазоне температур и быть устойчивыми к вибрациям. Традиционные валы из легированных сталей и титановых сплавов имеют ограничения по массе, склонность к коррозии и недостаточное демпфирование, что приводит к повышенным эксплуатационным расходам и снижению ресурса смежных агрегатов.

Применение полимерных композиционных материалов, особенно углепластиков, позволяет кардинально уменьшить массу конструкции (на 40–60 %), обеспечить высокую усталостную прочность и коррозионную стойкость, а также улучшить виброгасящие свойства. Однако широкое внедрение таких валов сдерживается отсутствием отработанных технологических процессов, учитывающих анизотропию свойств материала и требования серийного производства. Целью настоящей работы является разработка технологии изготовления карданного вала вертолета из композитных материалов, обеспечивающей требуемые механические характеристики при приемлемой себестоимости. Анализ материалов и методов формования. Среди армирующих наполнителей для высоконагруженных валов наиболее перспективны углеродные волокна

благодаря рекордной удельной прочности и жесткости. В качестве полимерной матрицы выбрано эпоксидное связующее холодного отверждения, обладающее высокой адгезией к углеродному волокну, малой усадкой и стойкостью к воздействию эксплуатационных сред [2, 3]. Сравнение стеклопластиков, арамидных и гибридных композитов по критериям прочности на кручение и стоимости показало преимущество углепластика с укладкой слоев под углами $\pm 45^\circ$. Для создания силовой преформы цилиндрической заготовки использован метод радиального плетения. В отличие от непрерывной намотки, он позволяет формировать бесшовную биаксиальную структуру с точно регулируемыми углами армирования, что критически важно для восприятия крутящего момента. Радиальное плетение обеспечивает высокий коэффициент наполнения волокном (до 58 %) и минимальное травмирование ровинга, что подтверждено экспериментами на углеродной нити UMT42-24K-EP [1]. Для пропитки сформованной сухой преформы применена технология вакуумной инфузии. Она не требует дорогостоящих автоклавов или жестких пресс-форм, позволяет получать длинномерные детали (длина разработанного вала 3845 мм) с низкой пористостью (менее 1 %) и хорошей повторяемостью свойств [5]. Закрытый процесс с контролируемым фронтом течения смолы минимизирует выделение летучих веществ и обеспечивает равномерное отверждение. Результаты прочностного и модального анализа. Расчетная модель вала построена в среде ANSYS. Оболочка вала моделировалась многослойным композитным пакетом с углами армирования $\pm 45^\circ$. Конечно-элементная сетка сгущалась в зонах болтовых отверстий, а передача нагрузки от фланцев моделировалась балочными элементами, имитирующими болты [6]. Критерием разрушения служил критерий максимальных напряжений для каждого монослоя. Расчеты показали, что разрушение начинается у крепежных отверстий при величине крутящего момента 2190 Н·м, что с запасом перекрывает типовые эксплуатационные нагрузки для карданного вала легкого вертолета. Максимальные общие перемещения не превышают допустимых значений, а жесткость конструкции остается в заданных пределах. Модальный анализ выявил пять низших собственных частот (табл. 1), лежащих в диапазоне 38,6...205,2 Гц. Все они находятся выше рабочих частот вращения несущего винта и трансмиссии, что исключает резонансные режимы и подтверждает вибрационную надежность вала.

Таблица 1 – Собственные частоты композитного карданного вала

Номер формы	1	2	3	4	5
Частота, Гц	38,58	38,59	105,6	105,6	205,2

Технологический процесс изготовления. Технологическая оснастка представляет собой цилиндрическую оправку длиной 3845 мм с диаметром

регулярной зоны 90 мм. Поверхность оправки покрывается антиадгезионным составом. Плетение преформы выполняется на автоматизированном комплексе HERZOG RF 1-144-100, оснащённом манипулятором подачи оправки. Структура пакета состоит из десяти монослоев с ориентацией волокон $\pm 45^\circ$: пять базовых слоёв формируют регулярную толщину 3 мм, пять дополнительных локально усиливают зоны крепления фланцев до 6 мм [1].

После оплетки преформа помещается на позиционеры, обрезается по технологическому припуску и собирается в вакуумный мешок. На поверхность укладываются жертвенная ткань и распределительная сетка, затем пленка герметизируется. Пропитка осуществляется эпоксидным связующим T20-60 с вязкостью не более 500 мПа·с при 25 °С и временем жизни не менее 120 мин [2]. Подача смолы ведётся от центра к краям в трансверсальном направлении при остаточном давлении около 5 мбар. Отверждение проводится при комнатной температуре в течение 24 ч с последующим постотверждением при 80 °С 6 ч. После извлечения из мешка композитная заготовка обрезается в размер, в ней с помощью кондуктора сверлятся крепежные отверстия, затем производится вклейка металлического фланца и втулок конструкционным клеем ВК-27.

Общая масса полученного вала составила 22 кг, что примерно в два раза легче стального аналога. Проведенные механические испытания подтвердили расчетные параметры прочности и жесткости, а также отсутствие дефектов структуры.

Заключение. Разработана и апробирована технология изготовления карданного вала вертолета из углепластика, включающая радиальное плетение сухой преформы и последующую вакуумную инфузию эпоксидной матрицей. Реализованная конструкция обладает разрушающим моментом 2190 Н·м и собственными частотами вне рабочих диапазонов, что гарантирует необходимые прочностные и динамические характеристики. Снижение массы на 40–60 % по сравнению с металлическими валами открывает возможность повышения топливной эффективности и грузоподъемности вертолета. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и организации серийного выпуска композитных трансмиссионных валов для авиационной техники.

Список литературы

1. Технический паспорт UMT42-24K-EP Углеродное волокно.
2. ТУ 2257-053-59846689-2016 Эпоксидное связующее T20-60.
3. Халиулин В.И. Технология производства композитных изделий : учеб. пособие. – Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2004. – 332 с.
4. Центр композитных технологий КНИТУ-КАИ [Электронный ресурс]. – URL: <http://kai-composite.com> (дата обращения: 20.04.2025).
5. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. – М.: Готика, 2003. – 516 с.

6. ГОСТ 25.602-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей.

УДК 629.7.018.4:539.43.

РЫЖКОВ М. Ю., ПЫХАЛОВ А. А.

Иркутский Национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕМОНТНЫХ ВТУЛОК НА ПРОЧНОСТЬ И УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

***Аннотация.** В статье представлено исследование влияния ремонтных втулок, устанавливаемых с радиальным натягом, на напряжённо-деформированное состояние, статическую и усталостную прочность соединений тонкостенных авиационных конструкций. Проведены статические и усталостные испытания образцов из сплава 1163AT с втулками из стали 30ХГСА при варьировании величины натяга и способа установки втулок. На основе полученных результатов сформулированы практические рекомендации по выбору параметров ремонта, обеспечивающих повышение ресурса восстановленных крепёжных отверстий.*

***Ключевые слова:** ремонтная втулка, натяг, метод конечных элементов, контактная задача, остаточные напряжения, усталостная долговечность, авиационные конструкции, цифровая корреляция изображений.*

Введение

Обеспечение длительной и безопасной эксплуатации авиационной техники требует эффективных методов восстановления повреждённых элементов планера. Одними из наиболее распространённых дефектов является износ, овализация или задиры в зонах крепёжных отверстий тонкостенных обшивок и силовых элементов. Традиционные способы ремонта – замена детали или установка усиливающих накладок – часто сопряжены с высокой трудоёмкостью, значительным увеличением массы и необходимостью демонтажа смежных агрегатов. Альтернативным подходом является применение ремонтных втулок (бужей), устанавливаемых в рассверленное дефектное отверстие с гарантированным радиальным натягом [1, 2].

Преимущества данного метода заключаются в восстановлении геометрической точности отверстия, а также в формировании в зоне данного концентратора благоприятного поля остаточных напряжений, способного существенно повысить сопротивление усталости [3]. Однако

проектирование такого ремонта для конкретных сочетаний материалов, применяемых в отечественном авиастроении (например, алюминиевый сплав 1163АТ – сталь 30ХГСА), сопряжено с рядом неопределённостей. К ним относятся: отсутствие систематизированных данных о влиянии величины натяга и способа монтажа на уровень монтажных пластических деформаций; итоговая усталостная долговечность; существующие инженерные методики не позволяют априорно определить эффективный коэффициент концентрации напряжений для отверстия с установленной втулкой [4].

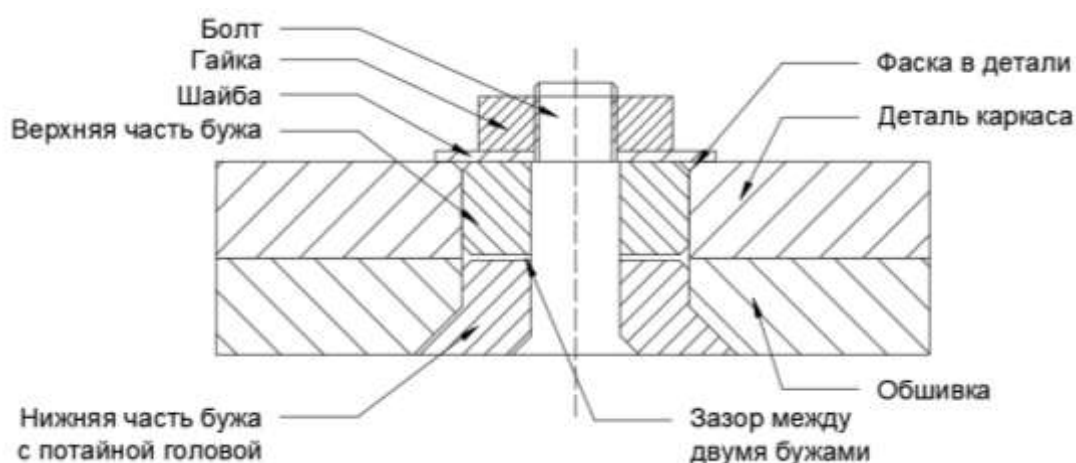


Рисунок 1 – Схема установки ремонтных втулок (бужей) в пакет деталей

Целью настоящей работы является разработка и апробация экспериментально-теоретической методики оценки влияния ремонтных втулок на прочностные характеристики соединений тонкостенных элементов авиаконструкций, включая проведение натурных испытаний, а также построение верифицированных конечно-элементных моделей.

Математическое моделирование и верификация

Метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в трёхмерной постановке, использован для анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) соединения «пластина – втулка». При моделировании учитывались три вида нелинейности: *физическая* (упругопластическое поведение материала пластины 1163АТ с изотропным упрочнением согласно критерию текучести Мизеса), *геометрическая* (большие перемещения при запрессовке) и *контактная* (взаимодействие поверхностей втулки и отверстия с трением). Для описания контакта применялся расширенный метод множителей Лагранжа, обеспечивающий точное выполнение условий непроникновения [5].

Верификация численных моделей выполнена в несколько этапов. На первом этапе решалась классическая задача Кирша о концентрации напряжений в пластине конечной ширины с центральным отверстием.

Сравнение с аналитическим решением и справочными данными Петерсона показало, что при размере конечного элемента 0,5 мм в зоне концентратора погрешность определения теоретического коэффициента концентрации K_t не превышает 2 % [6].

Экспериментальные исследования

Для верификации полей деформаций, возникающих непосредственно в процессе установки втулки, использован бесконтактный оптический метод цифровой корреляции изображений (система VIC-3D). На поверхность образцов из сплава 1163АТ наносилась спекл-структура, после чего выполнялась синхронизированная с испытательной машиной съёмка процесса запрессовки втулки либо установки втулки, предварительно охлаждённой в жидком азоте. Сопоставление экспериментальных полей деформаций с результатами конечно-элементного моделирования показало удовлетворительную сходимость: расхождение по максимальным значениям эквивалентных деформаций не превышало 17,6 % для запрессовки и 11,1 % для установки с охлаждением, что подтверждает корректность принятых в модели допущений и граничных условий (рисунок 2).

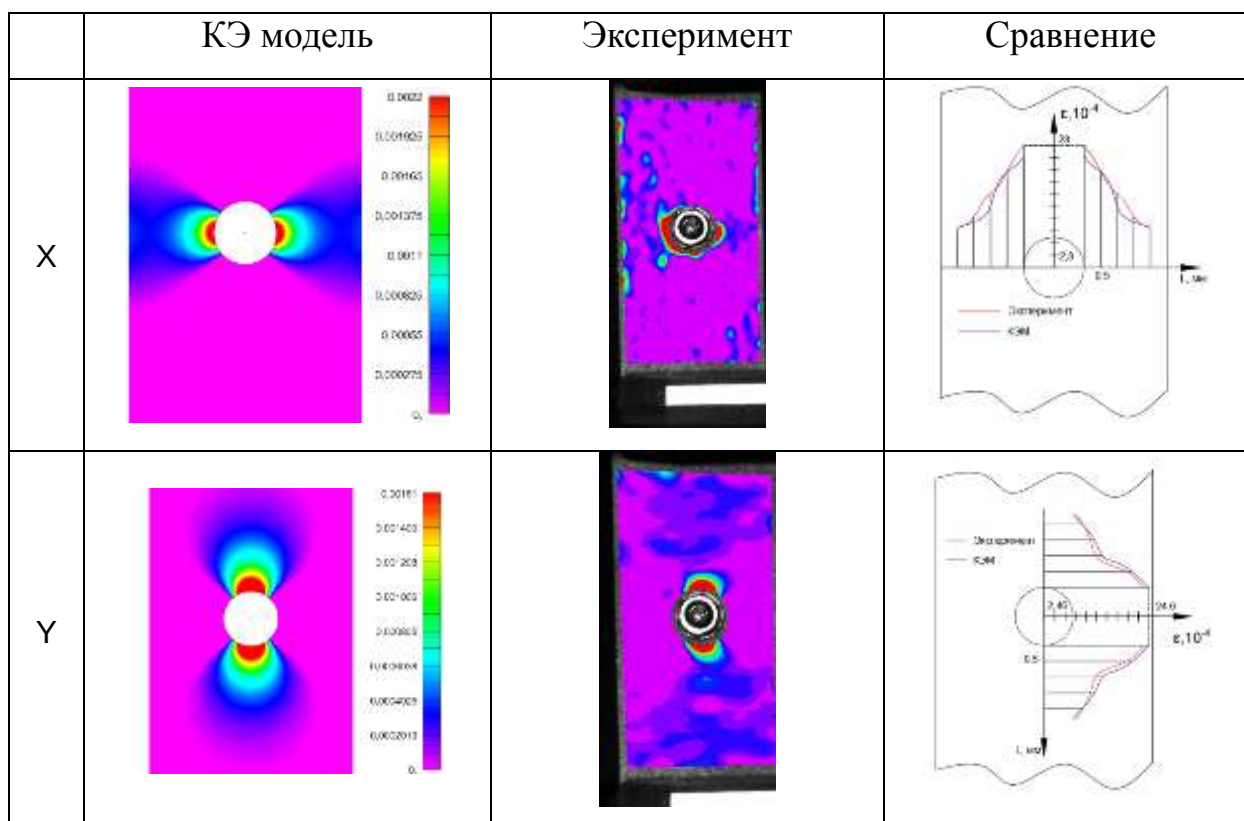


Рисунок 2 – Сравнение деформаций по осям X и Y, полученных на основе численного моделирования и натурного эксперимента

Статические испытания образцов со свободным отверстием и с втулками, установленными с натягом от 20 до 60 мкм, проведённые на универсальной машине Instron 5982, показали, что наличие втулки практически не изменяет предельную разрушающую нагрузку. Разрушение во всех случаях происходило при достижении материалом пластины критического уровня касательных напряжений по сечению, ослабленному отверстием и носило вязкий характер. Среднее разрушающее напряжение для образцов с втулками составило 45,1 кгс/мм² против 42,9 кгс/мм² для свободного отверстия, что находится в пределах статистического разброса. Способ установки (запрессовка или охлаждение) на статическую прочность значимого влияния не оказал.

Анализ результатов усталостных испытаний

Численное моделирование позволило детально проанализировать эволюцию компонент напряжений в опасной точке, располагаемой на контуре отверстия в сечении, перпендикулярном оси растяжения.

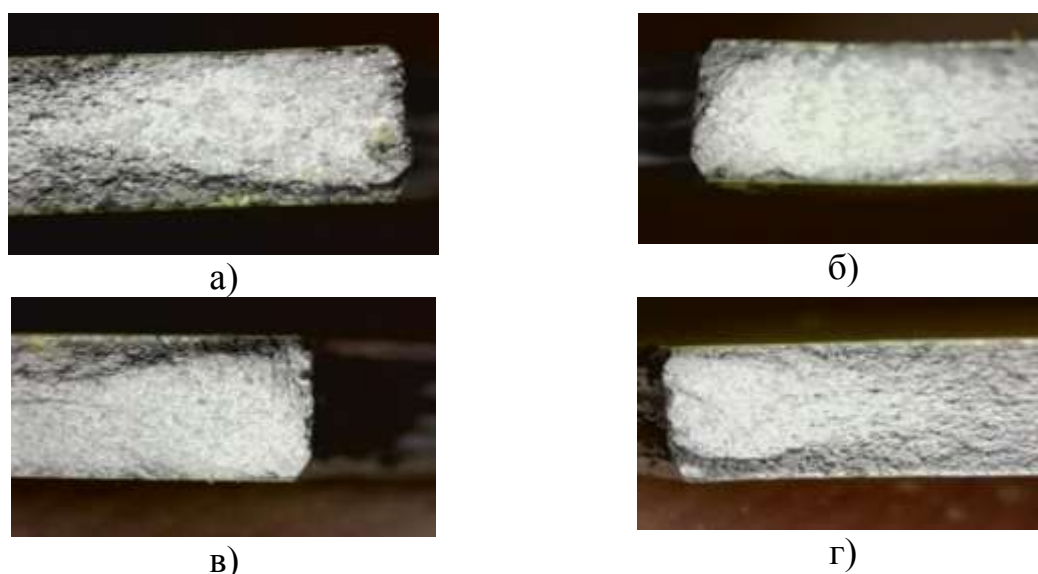


Рисунок 3 – Укрупненные фотографии в зоне разрушения образца; а), б) – фото образца с установленной втулкой с помощью метода охлаждения, в), г) – фото образца с установленной втулкой с помощью метода запрессовки

В результате усталостных испытаний установлено, что увеличение натяга в определенном диапазоне приводит к монотонному росту уровня начальных сжимающих окружных напряжений и, как следствие, к снижению амплитуды максимальных касательных напряжений в рабочем цикле (рисунок 4). Этот эффект является ключевым фактором повышения усталостной долговечности. Однако, при дальнейшем увеличении натяга в материале пластины уже на стадии монтажа возникают локальные пластические деформации, что создаёт микроструктурные повреждения и

служит дополнительным очагом зарождения усталостных трещин. Представленный натяг составляет 60 мкм (рисунок 4).

Выявлено, что при малых натягах (до 30 мкм) способ установки втулки – запрессовкой или охлаждением в азоте – не влияет на усталостную прочность [7].



Рисунок 4 – Зависимость долговечности от величины натяга втулки

Выводы и практические рекомендации. В результате выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработана верифицированная методика оценки прочности и усталостной долговечности соединений с ремонтными втулками для пары материалов 1163АТ – 30ХГСА. Установлено, что:

1. Статическая прочность пластины с отверстием при установке втулки с натягом до 60 мкм практически не изменяется и определяется свойствами основного материала.

2. Увеличение натяга способствует формированию благоприятных остаточных напряжений, однако, при превышении некоторого порога в 50 мкм, доминирующим становится негативное влияние монтажных пластических деформаций [8].

3. Способ установки (запрессовка или монтаж с охлаждением), при соблюдении заданного натяга, не оказывает статистически значимого влияния на итоговый ресурс конструкции.

Полученные результаты могут быть использованы в технологических и конструкторских подразделениях авиаремонтных предприятий для обоснованного выбора параметров восстановления крепёжных отверстий, что позволит повысить ресурс отремонтированных конструкций и снизить эксплуатационные риски.

Список литературы

1. Champoux R. L., Landy M. A. Fatigue Life Enhancement and High Interference Bushing Installation Using the ForceMate Bushing Installation Technique // ASTM Special Technical Publication. – 1986. – No. STP927. – P. 39–52.

2. Рыжков М. Ю., Пыхалов А. А., Яхненко М. С. Математическое моделирование сопряжения деталей с натягом с учётом их взаимного влияния на долговечность

сборной конструкции // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 74. – С. 5–19.

3. Bombardier Y., Li G., Renaud G. Fatigue life prediction at cold expanded fastener holes with ForceMate bushings // Proceedings of the 30th ICAF Symposium. – Cham: Springer, 2019. – P. 627–642.

4. Когаев В. П. Расчёты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

5. Wriggers P. Computational Contact Mechanics. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2006. – 518 p.

6. Pilkey W. D., Pilkey D. F. Peterson's Stress Concentration Factors. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. – 560 p.

7. Рыжков М. Ю., Пыхалов А. А., Зеньков Е. В. Влияние способа установки ремонтных втулок на напряжённо-деформированное состояние деталей планера летательного аппарата // Труды МАИ. – 2025. – № 143.

8. Рыжков М. Ю., Пыхалов А. А. Учёт начальных пластических деформаций при прогнозировании усталостной долговечности соединений с ремонтными втулками // Вестник МАИ. – 2025. – № (в печати).

УДК: 629.735.55

СЕРГЕЕВ Д.С., ЧИНАХОВ Д.А.

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

***Аннотация.** Развитие мультироторных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) ставит перед разработчиками задачу глубокого понимания аэродинамики винтомоторной группы. В отличие от самолетов классической схемы, мультироторные платформы функционируют в сложном поле собственных воздушных потоков. В данной статье представлен обзор современных численных и экспериментальных методов исследования распределения воздушных потоков, а также технических решений по управлению ими. Рассматриваются аспекты интерференции вихревых следов, влияние близости экранирующих поверхностей и конструктивные способы модификации поля скоростей для повышения эффективности и безопасности полетов.*

***Ключевые слова:** БПЛА, управление, авиация, управление воздушными потоками.*

Введение

Мультироторные БПЛА заняли свою нишу в сфере мониторинга, логистики и аэрофотосъемки благодаря способности к вертикальному взлету и посадке и высокому запасу управляемости. Однако их аэродинамика характеризуется крайней нестационарностью.

Взаимодействие вихревых следов нескольких несущих винтов приводит к сложной структуре течения воздушных потоков [2, 3, 8, 10].

Ключевой проблемой является не столько генерация тяги, сколько распределение результирующего воздушного потока [2, 4, 5, 7] и его воздействие на:

- Стабильность полета,
- Энергопотребление,
- Выполнение целевых задач.

Данный обзор рассматривает существующие подходы к моделированию, экспериментальному анализу и методам пассивного управления распределением потоков мультироторных систем.

Основные методы и подходы к исследованию потоков

Численное моделирование динамики вихревого следа (CFD)

Методы вычислительной гидродинамики (CFD) являются основным инструментом для детального анализа структуры течения.

Большинство исследований, включая анализ интерференции в групповом полете [1], используют осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с моделями турбулентности в связке с техникой Multiple Reference Frame (MRF) или скользящих сеток. Это позволяет с приемлемыми вычислительными затратами оценить тяговые характеристики и геометрию следа при различных межроторных расстояниях.

В работе [2] показано, что классическая модель вихря для одиночного винта неприменима к мультикоптерам напрямую. Взаимное влияние роторов создает зоны рециркуляции и сложную интерференцию, что требует моделирования всей системы в целом, включая фюзеляж. В данном обзоре отмечается, что смещение винтов значительно меняет поле скоростей под аппаратом.

Экспериментальные визуализационные техники

Физический эксперимент критически важен для валидации CFD-моделей и получения данных в условиях, трудно поддающихся расчету.

Цифровая трассерная визуализация (PIV) признана «золотым стандартом» для получения мгновенных полей скорости. Согласно обзору [2] с помощью PIV успешно исследуется эволюция концевых вихрей и их распад. Например, показано, что при расстоянии между осями винтов с 2.1R до 2.4R интерференция вихрей существенно снижается [3].

Дымовая визуализация используется для экспресс-оценки общей картины течения. В работе [1] использовали ее в аэродинамической трубе для демонстрации асимметрии следа при горизонтальном полете и обратного наклона факела.

Аэродинамическая интерференция в зависимости от режима полета

В работах подчеркивается, что распределение потоков кардинально меняется в зависимости от режима:

Режим висения: поток направлен вертикально вниз. Экспериментально [2, 4, 5] доказано, что влияние воздушной подушки ощущается на высотах до 5 радиусов винта, что гораздо больше теоретических предсказаний для одиночного винта.

Горизонтальный полет: в работе [1] методом CFD показано, что след наклоняется назад пропорционально скорости набегающего потока. Это создает асимметрию нагрузки на передние и задние винты, что необходимо учитывать в алгоритмах управления.

Исследования [10] показывают, что до 30% энергопотерь мультироторов связано с сопротивлением платформы и интерференцией винтов. По мере увеличения взлетной массы мультиротора и, соответственно, размеров и массы винтов управление изменением частоты вращения винтов может вызвать трудности из-за уменьшения чувствительности и запаздывания в управлении.

Технические решения по управлению и модификации потоков

Управление распределением воздушного потока часто осуществляется не активными системами сдува, а пассивными аэродинамическими элементами, изменяющими геометрию обтекания.

Импеллерные (канальные) винты.

Одним из наиболее эффективных методов изменения структуры потока является заключение винта в кольцевой канал. Это влияет на поток следующим способом:

- Перераспределение давления. Благодаря профилированной входной кромке на ней создается зона низкого давления, обеспечивающая дополнительную тягу и «спрямляющая» линии тока.
- Блокировка концевых вихрей. Канал физически ограничивает перетекание воздуха с нижней поверхности лопасти на верхнюю, радикально меняя эпюру скоростей за винтом.

В исследовании [6] на основе CFD для пропеллеров диаметром 406 мм показано, что при оборотах выше 4000 об/мин импеллерная компоновка обеспечивает прирост тяги до 2.1 Н за счет выравнивания потока и устранения радиального схода струи.

В контексте сельскохозяйственных БПЛА [7] отмечается, что импеллер не только повышает КПД, но и защищает пропеллеры от контакта с густой растительностью, позволяя точнее направлять поток на целевую поверхность.

В работе [8] исследования возможности создания подъемной силы в канале показали, что асимметричное введение решеток в стенки канала

способно индуцировать расширение зоны низкого давления, создавая боковую силу до 22% от тяги без существенного влияния на осевую тягу.

Асимметричные и наклонные конфигурации роторов

В обзоре [2] отмечено, что отклонение осей винтов внутрь приводит к значительному перераспределению следа вверх, уменьшая его воздействие на подстилающую поверхность или полезную нагрузку под дроном.

Концепции, описанные в работе [9], показывают, как комплексная оптимизация геометрии лопаток с помощью кривых Безье и многоцелевых генетических алгоритмов (MOGA) позволяет проектировать двигатели с заданным распределением параметров потока для конкретных задач.

Заключение

Обзор литературы показывает, что происходит переход от разработки интегральных силовых характеристик мультироторных систем к детальному изучению структуры поля скоростей воздушных потоков.

Основу современных методов исследования составляют гибридные подходы, сочетающие высокоточное численное моделирование с верификацией данными цифровой трассерной визуализации.

Заключение винта в канал является наиболее практичным и широко распространенным методом пассивного управления потоком. Этот подход позволяет не только увеличить тягу и снизить шум, но и радикально изменить форму струи, изолируя внутренний поток от внешних возмущений.

Параметры потока крайне неравномерны по вертикали и азимуту. Для прикладных задач критически важно эмпирическое картирование поля скоростей для выбора оптимальной точки установки оборудования.

Большинство работ сосредоточено на режимах висения и горизонтального полета. Нестационарные маневры и взаимодействие потоков в плотных группах (роях) остаются недостаточно изученными и требуют разработки новых адаптивных моделей турбулентности и валидации методами PIV.

Список литературы

1. Liu, C.; Li, B.; Wei, Z.; Zhang, Z.; Shan, Z.; Wang, Y. Effects of Wake Separation on Aerodynamic Interference Between Rotors in Urban Low-Altitude UAV Formation Flight. *Aerospace* 2024, 11, 865
2. G. Throneberry, C.M. Hocut, A. Abdelkefi Multi-rotor wake propagation and flow development modeling: A review / G. Throneberry, C.M. Hocut, A. Abdelkefi // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2021. № 127.
3. Dhwanil Shukla, Narayanan Komerath Multicopter Drone Aerodynamic Interaction Investigation / Dhwanil Shukla, Narayanan Komerath // *Drones*. – 2018. № 2(4). С. 43.
4. Caitlin Powers, Daniel Mellinger, Aleksandr Kushleyev, Bruce Kothmann & Vijay Kumar Influence of Aerodynamics and Proximity Effects in Quadrotor Flight / Caitlin

Powers, Daniel Mellinger, Aleksandr Kushleyev, Bruce Kothmann & Vijay Kumar // Experimental Robotics. – 2013. С. 289–302.

5. I. Sharf, M. Nahon, A. Harmat, W. Khan, M. Michini, N. Speal, M. Trentini, T. Tsadok and T. Wang Ground Effect Experiments and Model Validation with Draganflyer X8 Rotorcraft / I. Sharf, M. Nahon, A. Harmat, W. Khan, M. Michini, N. Speal, M. Trentini, T. Tsadok and T. Wang // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – 2014. С. 1158-1166.

6. Endrowednes Kuantama , Radu Tarca, Quadcopter thrust optimization with ducted-propeller / Endrowednes Kuantama , Radu Tarca, // MATEC Web of Conferences. – 2017.

7. Ferudun Efe KETME, Kıymet YILDIR, Gökem Efe AKKAYA, Alperen MISIRLI, Yusuf TEZCAN, Osman Nuri ŞAHİN, DESIGN AND DEVELOPMENT OF A DUCTED-FAN UAV FOR AGRICULTURAL PURPOSES / Ferudun Efe KETME, Kıymet YILDIR, Gökem Efe AKKAYA, Alperen MISIRLI, Yusuf TEZCAN, Osman Nuri ŞAHİN, // Journal of Transportation Management Research. – 2025.

8. Liu, L.; Mi, B. Lift–Thrust Integrated Ducted-Grid Fusion Configuration Design for a Ducted Fan Tail-Sitter UAV. Appl. Sci. 2025, 15, 7687. <https://doi.org/10.3390/app15147687>

9. Li, H.; Liu, K. Aerodynamic Design Optimization and Analysis of Ducted Fan Blades in DEP UAVs. Aerospace 2023, 10, 153. <https://doi.org/10.3390/aerospace10020153>

10. Xin, Huang. (2021). Design and analysis of retractable structure of new quadrotor landing gear. Journal of Physics: Conference Series. 1750. 012022. 10.1088/1742-6596/1750/1/012022.

УДК 539.4

ОШОРОВ А.Д., УШАКОВ И.В., БАТОМУНКУЕВ А.Ю.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

***Аннотация.** В работе исследовано влияние отрицательных и криогенных температур (293, 195 и 77 К) на механические свойства и характер разрушения аморфных и нанокристаллических металлических лент при одноосном растяжении. Объектами исследования являлись ленты на основе сплавов 5БДСР (нанокристаллическое состояние) и 82К3ХСР (аморфное состояние). Установлено, что понижение температуры испытания приводит к снижению прочностных характеристик обоих типов материалов и изменению характера разрушения аморфных лент с вязкого на хрупкое, сопровождающееся фрагментацией образца. Проведен сравнительный анализ полученных данных, необходимый для дальнейшего прогнозирования поведения композитных соединений на основе данных лент.*

Ключевые слова: аморфные сплавы, нанокристаллические сплавы, механические свойства, низкие температуры, хрупкое разрушение, одноосное растяжение.

Аморфные и нанокристаллические металлические сплавы, получаемые методом спиннингования (сверхбыстрой закалки расплава), представляют значительный интерес для современного авиационного материаловедения и техники благодаря уникальному комплексу физико-механических свойств [1,2]. Высокая прочность, коррозионная стойкость и особые магнитные характеристики делают их перспективными материалами для использования в качестве армирующих элементов в композитных конструкциях летательных аппаратов, работающих в экстремальных условиях.

Однако широкое внедрение таких материалов в авиастроение сдерживается недостаточной изученностью их механического поведения в широком диапазоне температур, особенно в области отрицательных температур и температур жидкого азота [3,4]. Для создания надежных композитных соединений необходимо понимание вклада каждого компонента (аморфной и нанокристаллической ленты) в общую прочность композита, а также знание температурных порогов хладноломкости.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ механических свойств (предела прочности и относительного удлинения) и морфологических особенностей разрушения аморфных лент сплава 82K3ХСР ($\text{Co}_{71,66}\text{Si}_{17,09}\text{B}_{4,73}\text{Fe}_{3,38}\text{Cr}_{3,14}$) и нанокристаллических лент сплава 5БДСР ($\text{Fe}_{77}\text{Si}_{13}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{B}_3$) при температурах 293, 195 и 77 К.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ленты изготовлены методом спиннингования на ПАО «Ашинский металлургический завод». Толщина лент составляла 30 мкм. Из рулонов лент методом механической вырезки были подготовлены образцы в форме полос с размером 25×100 мм. Такая геометрия выбрана для обеспечения устойчивого распространения деформации в условиях плоского напряженного состояния и соответствия методикам испытаний тонких листовых материалов.

Механические испытания на одноосное статическое растяжение проводились на универсальной испытательной машине Instron 3365. Нагружение осуществлялось с фиксированной постоянной скоростью деформирования 10^{-4} м/с. Для обеспечения заданных температурных условий использовались следующие методики: температура 195 К достигалась путем помещения образца и захватов в ёмкость со смесью твердого диоксида углерода («сухой лед») с ацетоном, что обеспечивает стабильное охлаждение без резких перепадов; температура 77 К обеспечивалась полным погружением образца в сосуд Дьюара с жидким

азотом. Образцы выдерживались в среде в течение 10 минут для выравнивания температуры по сечению перед началом нагружения. Контрольная группа испытывалась при комнатной температуре 293 К.

После разрушения проводился фрактографический анализ поверхности изломов и оценка морфологии разрушения с использованием методов оптической и цифровой микроскопии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены диаграммы растяжения нанокристаллического сплава 5БДСР, иллюстрирующие зависимость напряжения σ от относительной деформации ϵ .

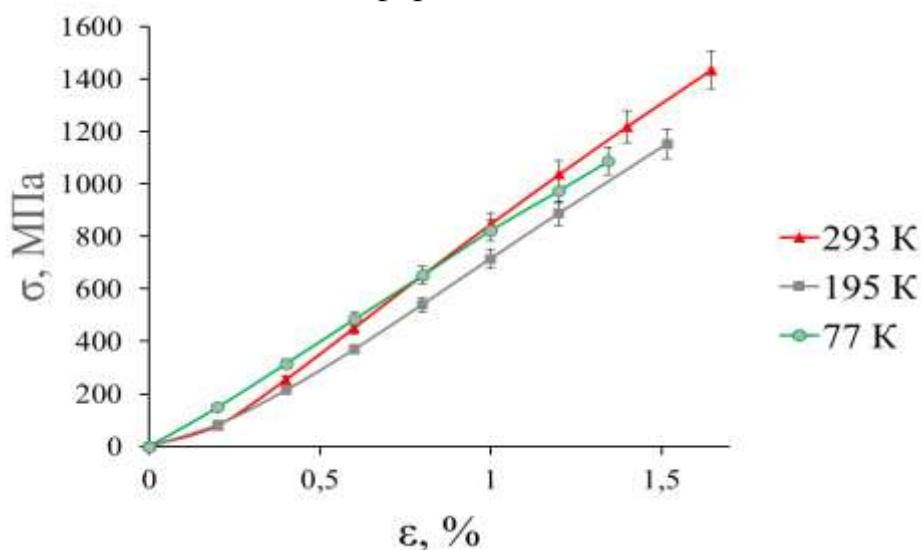


Рисунок 1 – Влияние температуры испытания на механическое поведение нанокристаллического сплава 5БДСР при растяжении

Анализ кривых деформации и расчет средних значений механических характеристик показывает, что с понижением температуры происходит монотонное снижение как прочностных, так и пластических свойств материала.

Снижение предела прочности при охлаждении с 293 до 77 К составляет ~43%. Данное явление нехарактерно для большинства поликристаллических металлических материалов, у которых предел прочности с понижением температуры обычно растет. Наблюдаемый эффект может быть связан с особенностями нанокристаллической структуры: наличием избыточной энергии границ зерен и возможным протеканием низкотемпературной релаксации напряжений, либо с изменением механизма деформации от зернограничного проскальзывания к более хрупкому внутризеренному сколу [1,5,6].

На рисунке 2 представлены диаграммы растяжения аморфного сплава 82К3ХСР при исследуемых температурах.

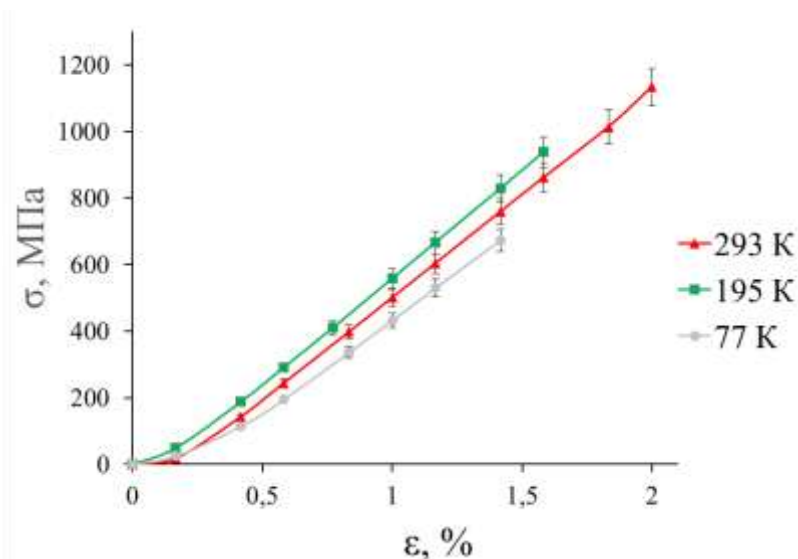


Рисунок 2 – Влияние температуры испытания на механическое поведение аморфного сплава 82K3ХСР при растяжении

Для аморфного сплава также характерно снижение прочности и пластичности с падением температуры, однако количественные значения отличаются.

Важно отметить, что при комнатной температуре предел прочности аморфного сплава 1435 МПа значительно превышает прочность нанокристаллического аналога (1130 МПа). Однако при охлаждении до 77 К этот разрыв сокращается: прочность аморфного сплава падает на ~24%, в то время как нанокристаллического – на 43%. Тем не менее, абсолютные значения прочности аморфной фазы остаются выше во всем исследуемом диапазоне.

Исследование макро- и микроструктуры разрушенных образцов выявило смену механизма разрушения аморфного сплава 82K3ХСР в зависимости от температуры. При комнатной температуре (293 К) разрушение образцов носило классический вязкий характер. Образцы делились преимущественно на две части. Поверхность излома ориентирована под углом примерно 45° к оси нагружения, что указывает на действие максимальных касательных напряжений и разрушение путем сдвига. На поверхности видны характерные «вязкие» структуры, связанные с образованием и слиянием полос сдвига.

При понижении температуры до 195 К характер разрушения меняется на хрупкий. Разрушение происходит без макропластической деформации, образцы раскалываются на две или несколько частей с неровной поверхностью скола.

При криогенной температуре 77 К наблюдается полная фрагментация образца с образованием множества мелких осколков. Это свидетельствует о практически нулевой трещиностойкости материала при данной температуре. Энергия, запасенная в процессе упругого деформирования,

высвобождается лавинообразно, порождая множество трещин, которые делят образец на мелкие фрагменты. Поверхность излома имеет характерный «ручьистый» узор, типичный для хрупкого разрушения аморфных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что для аморфных (82К3ХСР) и нанокристаллических (5БДСР) металлических лент характерно аномальное снижение предела прочности при понижении температуры испытания от 293 до 77 К. Наибольшее падение прочности зафиксировано для нанокристаллического сплава 5БДСР (с 1130 до 640 МПа).

2. Пластичность (относительное удлинение) обоих типов материалов также снижается при охлаждении, однако аморфный сплав сохраняет некоторую способность к пластической деформации вплоть до 195 К.

3. Выявлена смена механизма разрушения аморфного сплава 82К3ХСР: от вязкого разрушения срезом при 293 К к хрупкому разрушению с полной фрагментацией образца при 77 К.

4. Полученные данные являются основой для последующего анализа напряженно-деформированного состояния и разрушения гибридных композитных материалов, армированных данными лентами, в условиях низкотемпературного воздействия. Аморфные ленты, обладая более высокой исходной прочностью, требуют особого внимания при эксплуатации в криогенных условиях из-за склонности к хрупкому растрескиванию.

Список литературы

1. Гиннэ С. В. Аморфные металлические материалы: ключевые особенности и свойства // Эпоха Науки. 2023. – №. 34. – С. 41–46.

2. Structure and cryogenic mechanical properties of severely deformed nonequiatomic alloys of Fe–Mn–Co–Cr system / E. D. Tabachnikova, T. V. Hryhorova, S. N. Smirnov [et al.] // Low Temperature Physics. – 2023. – Vol. 49, No. 11. – P. 1294-1305. – DOI 10.1063/10.0021377

3. Ушаков, И. В. Физика заживления нанопор в конденсированном веществе в условиях воздействия лазерного излучения и высокотемпературной плазмы / И. В. Ушаков, И. С. Сафронов, А. Д. Ошоров // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2024. – № 1(62). – С. 7-18. – DOI 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18.

4. Сафронов, И. С. Параметрические характеристики нано- и микропор, влияющие на их заживление при селективной лазерной обработке / И. С. Сафронов, А. И. Ушаков, О. В. Андрухова // Прикладная математика & Физика. – 2024. – Т. 56, № 3. – С. 226-233. – DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-3-226-233.

5. Ушаков И. В. Физика воздействия высокотемпературного импульсного нагрева на дефекты в поверхностном слое металлического сплава / И. В. Ушаков, И. С. Сафронов, А. Д. Ошоров [и др.] // Metallurg. – 2023. – № 7. – С. 74-79

6. Слядников, Е. Е. Неоднородная пластическая деформация аморфных металлических сплавов под действием квазистатической механической нагрузки / Е. Е. Слядников, И. Ю. Турчановский // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, № 1. – С. 104-116. – DOI 10.21883/JTF.2023.01.54069.114-22

УДК 678.0

ШАРАПОВ М. А., СОЛОВЬЕВ Р. И., АМИРОВА Л. М.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

***Аннотация.** В работе представлена экспериментальная методика и результаты послойного ультразвукового соединения термопластичных композиционных материалов на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК/РЕЕК), армированного углеродным волокном. Описан технологический приём последовательного наваривания слоёв толщиной 1,4 мм путём локализации ультразвукового воздействия. Проведён микроструктурный анализ зоны сплавления на оптическом микроскопе. Установлено, что реализуемый технологический подход обеспечивает формирование сварных соединений с минимальной дефектностью и может быть использован при изготовлении утолщённых элементов из термопластичных композитов.*

***Ключевые слова:** термопластичные композиционные материалы, ультразвуковая сварка, полиэфирэфиркетон.*

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к термопластичным композиционным материалам, обусловленный их высокой удельной прочностью, технологичностью переработки и возможностью вторичной переработки [1]. Одним из ключевых вопросов при расширении области их применения является разработка эффективных методов соединения, обеспечивающих высокую прочность и минимальное ухудшение структуры материала. В этом контексте ультразвуковая сварка представляет собой перспективный метод формирования неразъёмных соединений, отличающийся высокой скоростью процесса и локализованным тепловыделением. Механизм ультразвуковой сварки термопластов основан на генерации тепла в зоне контакта за счёт трения и вязкоупругих потерь, что приводит к повышению температуры до значений, обеспечивающих подвижность макромолекул и их последующую диффузию через границу раздела. При достижении температуры выше температуры стеклования или плавления полимера

происходит взаимное проникновение макромолекулярных цепей, формирующее прочное межфазное соединение [2].

Целью настоящей работы является исследование возможности формирования многослойных структур из термопластичных композиционных материалов методом последовательного ультразвукового наваривания, а также оценка качества формируемых соединений на основе анализа микроструктуры зоны соединения, включая характер распределения и уровень пористости. Объектом исследования являются многослойные соединения из термопластичных композиционных материалов CF/PEEK, сформированные методом ультразвуковой сварки слоёв толщиной 1,4 мм.

В настоящей работе реализован подход послойного ультразвукового наваривания термопластичного материала. Экспериментальные исследования проводились с использованием установки ультразвуковой сварки MSP-A AT2040 Dynamic Trigger Welding machine мощностью 4 кВт.

Для обоснования выбора технологических режимов ультразвуковой сварки были использованы данные дифференциальной сканирующей калориметрии полученные при помощи прибора DSC 204 F1 Phoenix. Данные ДСК показывают, что для полимера PEEK температура стеклования составляет порядка 140–145 °С, температура плавления находится в диапазоне 335–345 °С, а термоокислительная деградация происходит при температуре выше 500 °С. Реологические исследования PEEK, проводимые в рамках данного исследования на приборе HAAKE RheoStress 6000, показали выраженную температурно-временную зависимость вязкости расплава: при повышении температуры до 400 °С достигается минимальное значение динамической вязкости порядка 800 Па·с. Таким образом, оптимальной температура сварки является – 400 °С достигаемые при следующих режимах сварки: сварочное усилие составляло 650 Н, длительность ультразвукового воздействия – 2 с, время выдержки под давлением после прекращения колебаний – 10 с.

Контроль температурного режима осуществлялся с использованием высокоточного инфракрасного пирометра Optris CTlaser 3M. Измерение температуры проводилось бесконтактным методом на внешней поверхности образца в области сварного стыка.

Указанные параметры обеспечивают формирование устойчивого теплового поля в зоне контакта и уплотнение материала в процессе охлаждения, что создает условия для формирования межслойного соединения.

Формирование структуры осуществляется поэтапно методом последовательного наваривания. На первом этапе выполняется сварка двух образцов толщиной 1,4 мм с образованием утолщённой заготовки. На последующих этапах на её поверхность последовательно навариваются дополнительные слои аналогичной толщины. Воздействие ультразвуковой

сварки прикладывается со стороны тонкого добавляемого образца, что обеспечивает проплавление его объёма и поверхностного слоя уже сформированной более толстой заготовки. Таким образом реализуется последовательное соединение до пяти слоёв материала.

Принципиальной особенностью данного подхода является локализация теплового воздействия в зоне межслойного контакта. Это позволяет обеспечить расплавление полимерной матрицы на границе раздела без избыточного прогрева всего объёма заготовки. При каждом последующем цикле сварки происходит формирование нового межслойного соединения, а итоговая структура представляет собой многослойный материал, полученный за счёт последовательного наваривания отдельных слоёв. Оптимально выбранные технологические параметры режимов ультразвуковой сварки обеспечивает необходимую интенсивность тепловыделения и условия для взаимной диффузии макромолекул в зоне контакта. Это способствует формированию прочного межфазного соединения без избыточного выдавливания расплава и деградации полимерной матрицы.

Для оценки качества сформированных соединений проводился микроструктурный анализ зоны провара, образцы вырезаются перпендикулярно плоскости сварки, шлифуются, полируются и исследуются на оптическом микроскопе Olympus GX51 при увеличениях, позволяющих детально рассмотреть зоны сплавления.

Анализ включал оценку сплошности соединения, характера зоны термического влияния, наличия непроваров, пористости и состояния армирующей структуры. Недостаточная энергия сварки может приводить к образованию непроваров, тогда как избыточная энергия способствует появлению пористости в зоне термического влияния [3].

Особое внимание уделялось оценке пористости в зоне провара, поскольку данный параметр является одним из ключевых показателей качества сварного соединения. Следует отметить, что пористость и непровары оказывают различное влияние на качество соединения. Наличие непровара является более критичным дефектом, поскольку приводит к нарушению сплошности соединения и снижению несущей способности сварного шва. Пористость в зоне термического влияния также влияет на эксплуатационные свойства материала, однако при её низком уровне и локальном характере она не приводит к существенному нарушению целостности соединения.

Контроль микроструктуры показал, что в сформированных соединениях наблюдается плотная структура с незначительным количеством пор. Поры имеют локальный характер, малые размеры и не образуют развитой дефектной сети. Это свидетельствует о достаточной степени проплавления материала, эффективном вытеснении воздуха из зоны контакта и формировании плотного межслойного соединения.

Список литературы

1. M. Bonmatin, F. Chabert, G. Bernhart, T. Cutard, T. Djilali, Ultrasonic welding of CF/PEEK composites: influence of welding parameters on interfacial temperature profiles and mechanical properties, *Composites Part A* 162 (2022) 107074.
2. H. Li, C. Chen, R. Yi, Y. Li, J. Wu, Ultrasonic welding of fiber-reinforced thermoplastic composites: a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120 (2022) 29–57.
3. I.F. Villegas, Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (2014).

СЕКЦИЯ 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИОНИКИ

УДК 629.7.054.07

АНТОНЕЦ И. В., НИГМАТУЛЛИНА Л. А.

Ульяновский институт гражданской авиации имени

Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ: ОТ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ДО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

***Аннотация.** В статье представлены результаты разработок оригинальных датчиков статического и полного давлений – источников первичной информации в системах воздушных сигналов (СВС) комплексов управления летательными аппаратами. Приведены четыре конструктивных решения, которые в качестве первичных преобразователей датчиков давления используют упругие чувствительные элементы, а в качестве вторичных преобразователей – оптоэлектронные линейки. Предлагаемые решения позволяют, по сравнению с распространенными в настоящее время частотными датчиками давления, повысить точность измерений, снизить массогабаритные параметры конструкций и энергопотребление. Рассмотрены технические решения вариантов конструкций упругого чувствительного элемента, элементов съема информации, а также предложения по использованию предлагаемых датчиков для определения углов атаки и скольжения. Датчики отличаются высокой эксплуатационной надежностью, определяемой отсутствием целого ряда погрешностей: упругих несовершенств первичного преобразователя, вибрации и ударов, температурных колебаний и других.*

***Ключевые слова:** система воздушных сигналов, оптоэлектронный датчик давления, статическое давление, полное давление, оптоэлектронная линейка, упругий чувствительный элемент, угол атаки, угол скольжения.*

Система воздушных сигналов (СВС) предназначена для вычисления высотно-скоростных параметров полета воздушного судна (ВС), производя измерения во внешней среде, и передачу цифровой информации в комплекс управления ВС. Для такого рода систем существенная роль отведена датчикам давления. Частотные датчики давления [1, 2] являются наиболее распространенными в настоящее время, однако их технические характеристики обладают рядом недостатков. К ним относятся

значительные массогабаритные параметры и высокое энергопотребление, чувствительность к вибрациям и ударам, а также к температурным колебаниям. Существенным недостатком является срыв колебаний на некоторых частотах.

Для решения задач, обеспечивающих повышение точности измерений статического и полного давлений, снижение электропотребления, снижение массогабаритных параметров, расширение функциональных возможностей источников первичной и вторичной информации и повышения динамической устойчивости датчиков давлений, нами разработаны варианты конструкций датчиков давлений на основе упругого элемента и оптоэлектронного преобразователя.

Первая конструкция (базовая модель) датчика статического и полного давлений, использующего оптоэлектронный преобразователь [3], представлена на рис. 1.

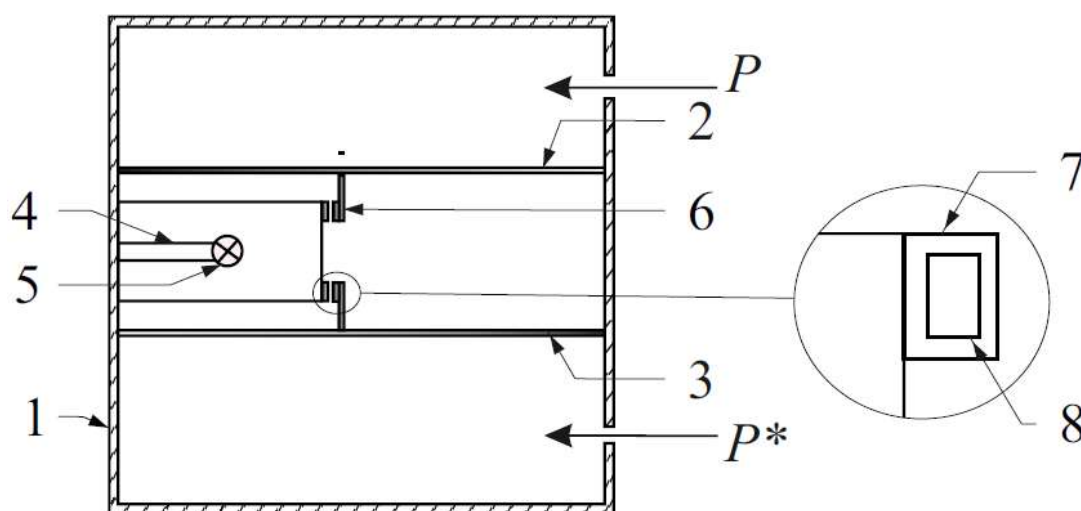


Рисунок 1 - Датчик давления, использующий оптоэлектронный преобразователь: 1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 – стойка, 5 – источник излучения, 6 – оптоэлектронная линейка, 7 – шторка, 8 – прорезы

Точность определения выходного сигнала с оптоэлектронной линейки зависит от положения светового пятна на линейке и зависит от перемещения шторки. Эти датчики обладают рядом существенных достоинств: высокой чувствительностью, относительной простотой и сравнительно меньшими массогабаритными параметрами, энергопотреблением и охватывают весь диапазон атмосферных давлений, соответствующих высотам от -500 до 20 000 м. Однако и этим датчикам свойственны недостатки – это гистерезис, который проявляется ввиду наличия только одного упругого элемента, нелинейность статической характеристики по высоте. При использовании одной щели в шторке,

алгоритм определения позиции обычно основан на поиске края пятна или пика интенсивности. Если источник света (светодиод) деградирует или меняется температура, общая освещенность падает. Шторка с одной щелью в такой ситуации теряет четкий контраст, что приводит к «плаванию» расчетного центра и появлению погрешности из-за изменения амплитуды сигнала, а не физического перемещения.

Поэтому развитие базовой модели происходило по нескольким направлениям:

- модернизация упругого элемента с целью повышения чувствительности, линеаризации статических характеристик УЧЭ по высоте;
- повышение точности обработки информации с оптоэлектронной линейки.

Вторая конструкция [4] разработана с целью модернизация упругого элемента (рис. 2).

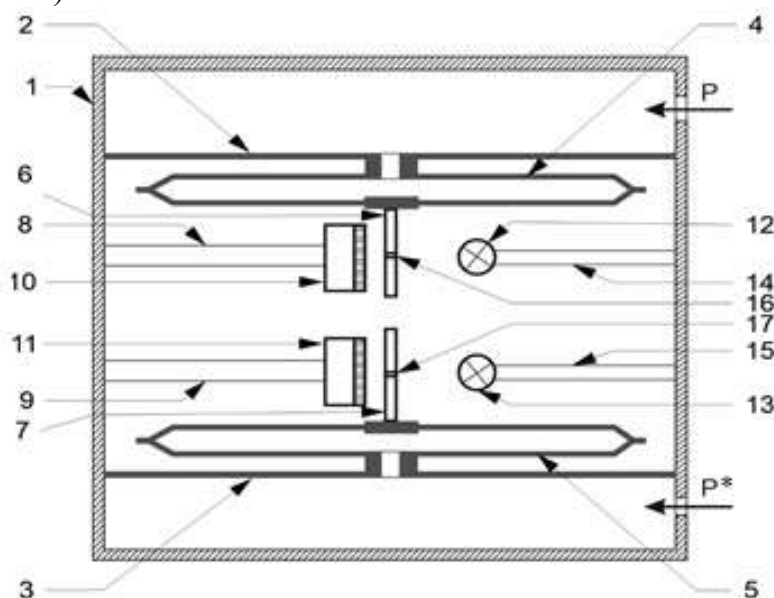


Рисунок 2 - Датчик давлений: 1 – корпус; 2 и 3 – упругие мембраны; 4 и 5 – манометрические коробки; 6 и 7 – шторки; 8, 9, 14, 15 – стойки; 10 и 11 – оптоэлектронные линейки; 12 и 13 – источники излучения; 16 и 17 – прорези

Предлагаемый датчик за счет введения манометрических коробок позволяет значительно повысить точность измерения нелинейно изменяющегося давления (статического и полного) во всем диапазоне его измерения, имеет высокую устойчивость к вибрациям. Кроме того, крепление манометрических коробок к упругим мембранам осуществляется по жестким центрам, при этом их упругие характеристики практически не меняются, а технологический процесс крепления значительно упрощается. Принципиально новым является то, что упругая

мембрана и упругие мембраны в составе манометрической коробки всегда находятся во взаимно встречном движении.

Третья конструкция датчика статического и полного давлений [5] разработана с целью повышение точности выходного сигнала с оптоэлектронной линейки (рис. 3).

Конструктивное и функциональное исполнение предлагаемого датчика, обеспечивает:

1) применение шторок с n щелями позволяет сформировать на оптоэлектронную линейку n световых пятен, перемещающихся пропорционально изменению измеряемого давления. Благодаря этому за один период опроса с линейки удастся получить n независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения примерно в $\sqrt{n}$ раз;

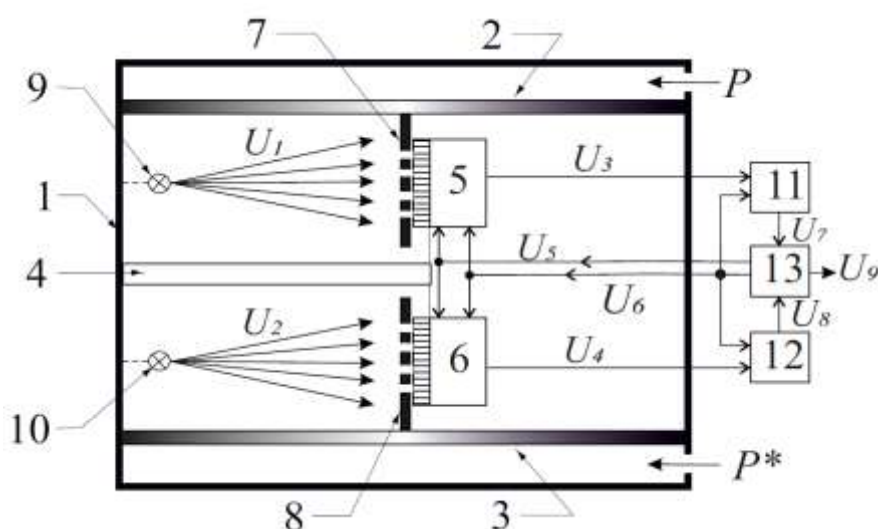


Рисунок 3 – Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с n количеством оптических пятен:

1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 – стойка, 5 и 6 – оптоэлектронные линейки, 7 и 8 – шторки с прорезями (щелями), 9 и 10 – источники излучения, 11 и 12 аналогово-цифровой преобразователь, 13 – микроконтроллер

2) улучшает динамические свойства датчика за счет отсутствия на шторках 7 и 8 дополнительных элементов (излучателей и оптоэлектронных линеек).

Четвертая конструкция измеритель параметров окружающего и набегающего воздушных потоков [6] разработан для определения углов атаки и скольжения (рис. 4).

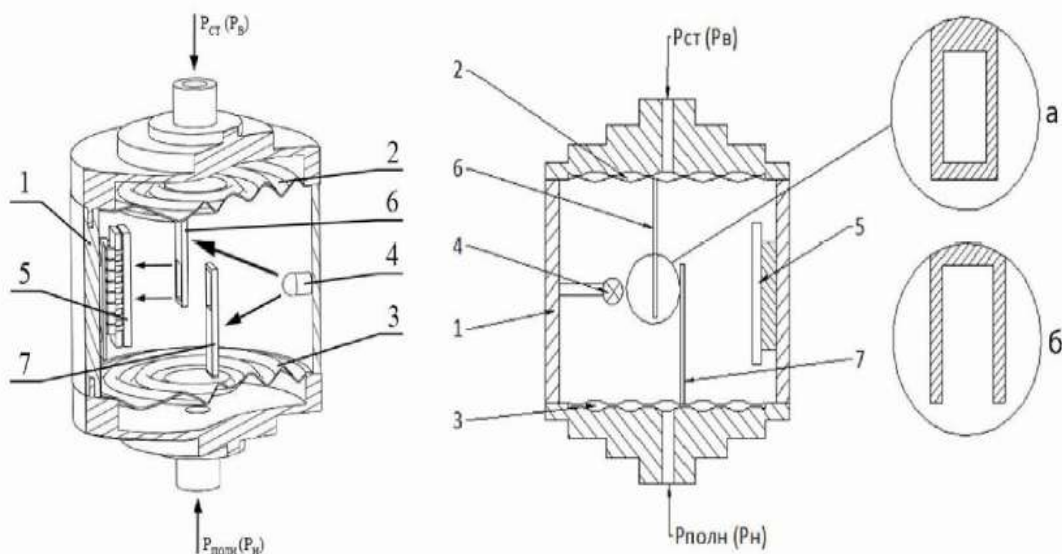


Рисунок 4 - Измеритель параметров окружающего и набегающего воздушных потоков: 1 – корпус; 2 и 3 – верхняя и нижняя мембраны; 4 – источник излучения; 5 – оптоэлектронная линейка; 6 и 7 – шторки с прорезями

Такое конструктивное решение позволяет измерять не только статическое и полное давление, но и определять углы атаки и скольжения за счет анализа дифференциального сигнала от двух шторок, смещенных относительно друг друга.

Таким образом, предлагаемые решения разработанных датчиков давлений могут использоваться не только для вычисления высотно-скоростных параметров полета (барометрической высоты, приборной и истинной скорости), но и для измерения углов атаки и скольжения. Функционирование устройств осуществляется с использованием известных средств измерения и передачи электрических сигналов: аналого-цифровых преобразователей, микроконтроллера и компьютера, выполняющего функцию устройства регистрации давлений.

В таблице представлено сравнение технических характеристик частотного датчика давления [2] с экспериментальными данными разработанных оптоэлектронных датчиков давления [7].

Таблица – Сравнительная характеристика датчиков давления типа ДДГ и оптоэлектронного датчика давлений на основе ЛФП

Параметр	Частотный датчик давления	Оптоэлектронный датчик давления
Потребляемая мощность, мВт	1000	297,8
Масса, г	400	200
Время готовности, с	30	1
Погрешность измерений, Па	32	10,16

Параметр	Частотный датчик давления	Оптоэлектронный датчик давления
Технологичность изготовления	Брак до 70 %	Технологично
Влияние температуры	Значительное	Минимальное
Выходной сигнал	Аналоговый	Цифровой

Оптоэлектронный датчик давления превосходит частотный датчик типа ДДГ по точности, энергопотреблению, массе, быстродействию и технологичности, а также обеспечивает цифровой выходной сигнал.

Список литературы

1. Антонец И. В., Борисов Р. А., Нигматуллина Л. А., Борисова Д. Р. Определение упругих характеристик первичного преобразователя датчика давления в системе воздушных сигналов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2025. Том 68. № 7. С 590-599.
2. Ключев Г. И., Макаров Н. Н., Солдаткин В. М. Авиационные приборы и системы. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 343 с.
3. Патент № 2653596 Российская Федерация, МПК G01L 7/00 (2006.01). Датчик аэрометрических давлений : № 2017111362, заявл. 04.04.2017, опубл. 11.05.2018 / Антонец И.В., Горшков Г.М., Борисов Р.А.; заявитель УлГТУ. Бюл. № 14.
4. Патент № 2762543 Российская Федерация, МПК G01L 7/02 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01), СПК G01L 7/026 (2021.08), G01L 11/025 (2021.08). Датчик статического и полного давлений : № 2020138917 : заявл. 25.11.2020 : опубл. 21.12.2021 / Антонец И. В., Борисов Р. А., Горшков Г. М., Нигматуллина Л. А.; заявитель УлГТУ. Бюл. № 36.
5. Патент № 2712777 Российская Федерация, МПК G01L 7/02 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01). Датчик аэрометрических давлений : № 2019114581, заявл. 13.05.2019, опубл. 31.01.2020 / Антонец И.В., Борисов Р.А., Черторийский А. А.; заявитель ФГБУ науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Бюл. № 4.
6. Патент № 2796818 Российская Федерация, МПК G01L 7/00 (2006.01), СПК G01L 7/00 (2023.02). Измеритель параметров окружающего и набегающего воздушных потоков на летательных аппаратах: № 2022133891: заявл. 22.12.2022: опубл. 29.05.2023 / Антонец И. В., Борисов Р. А., Милашкин А. А., Нигматуллина Л.А., Горшков Г. М.; заявитель УлГТУ. Бюл. № 16.
7. Антонец И. В., Нигматуллина Л. А. Разработка и исследование вторичного преобразователя информации датчика давлений в системе воздушных сигналов // Датчики и системы. 2025. № 1 (279). С. 54–61.

УДК 004.94

ВАЛИТОВ Р.Р., КИСЕЛЕВ С.К.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВИАЦИОННОГО ПРОЖЕКТОРА

***Аннотация.** В статье рассматривается подход к разработке цифрового двойника авиационного прожектора на этапе проектирования,*

Двойник ориентирован на сквозную проверку оптических, тепловых, прочностных и электрических характеристик изделия до изготовления физического прототипа. Предложенная архитектура двойника позволяет уменьшить число ошибок на ранних стадиях, сократить объем натурных испытаний и повысить вероятность получения работоспособного первого образца.

Ключевые слова. Цифровой двойник, авиационный прожектор, Design Digital Twin, CAD, CAE, ROM, FMI/FMU, оптическое моделирование, тепловой анализ, прочностной анализ, валидация.

Актуальность разработки

Задачей разработки цифрового сложного изделия на этапе проектирования (Design Digital Twin) является получение его комплексной валидированной математической модели, которая гарантирует, что физический образец изделия будет отвечать заданным характеристикам с большой вероятностью. Цифровой двойник используется для виртуального тестирования и оптимизации характеристик изделия, для исключения ошибок при создании реальных прототипов, для оценки технологичности и сборки, подготовки доказательной базы для сертификации [1].

Авиационные прожекторы относятся к критически важным элементам бортового оборудования, поскольку обеспечивают светотехнические функции в условиях жестких ограничений по массе, габаритам, энергопотреблению и надежности. Их проектирование усложняется тем, что повышение силы света и эффективности часто сопровождается ростом тепловыделения, а улучшение виброустойчивости нередко приводит к увеличению массы конструкции.

При этом, так как до 80% потребляемой энергии переходит в теплоту, то тепловой режим прямо влияет на ресурс светодиодов и стабильность оптических параметров. В таких условиях проектирование становится многокритериальной задачей, где требуется одновременно учитывать оптику, тепловыделение, прочность и электрические характеристики.

Большую часть из этих задач можно решить разработкой и использованием на этапе проектирования цифрового двойника прожектора.

Процесс разработки цифрового двойника авиационного прожектора

Содержание процесса разработка цифрового двойника авиационного прожектора представлено на рис. 1.

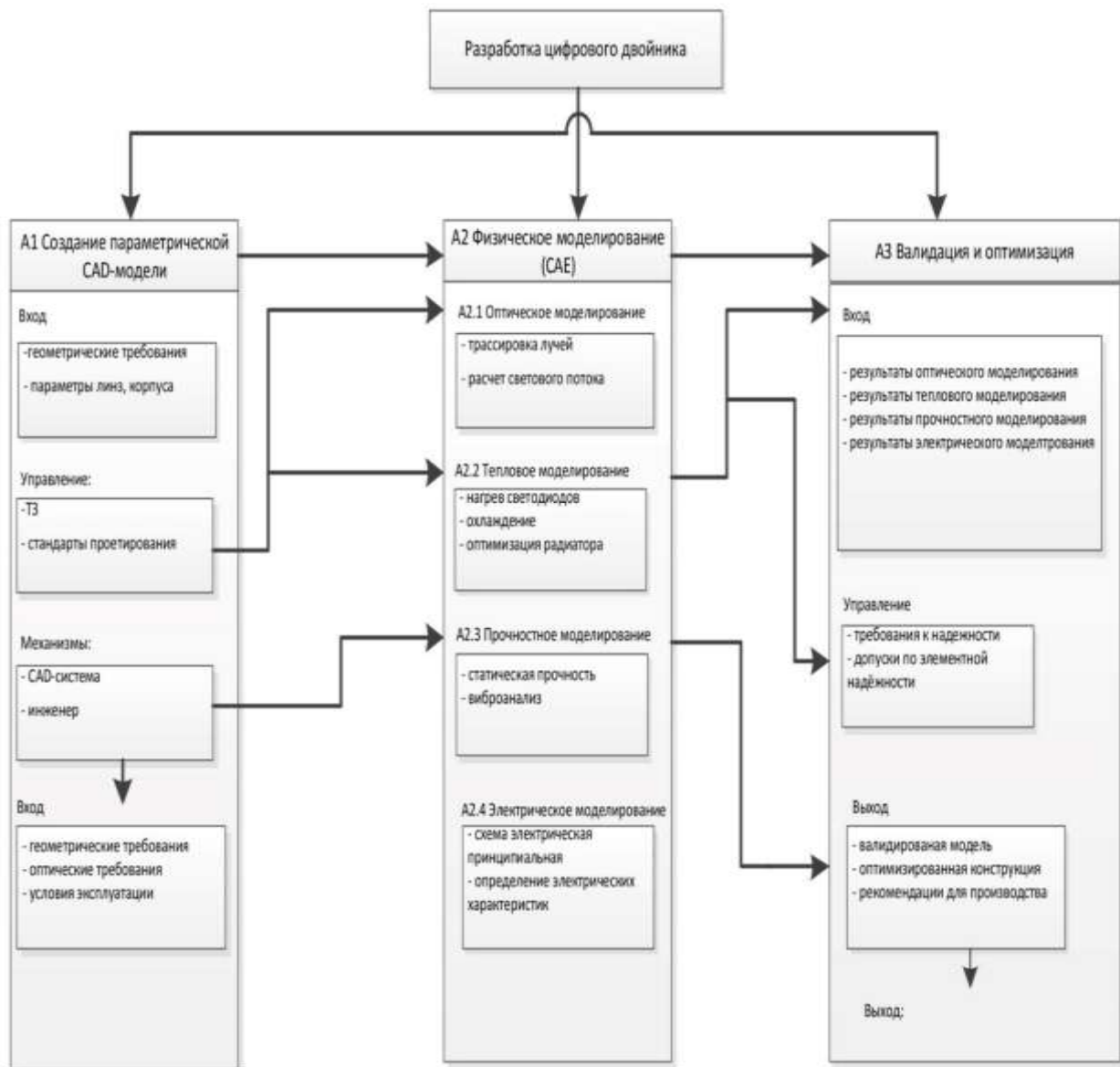


Рисунок 1 – Процесс разработки цифрового двойника

Разработка Design Digital Twin для авиационного прожектора строится как итерационный цикл: CAD-модель формируется в блоке A1, затем передается в CAE-блок A2, после чего результаты проходят валидацию в A3 и при необходимости возвращаются на этап проектирования для корректировки. Такой замкнутый контур обеспечивает последовательное уточнение модели и снижает риск ошибок при переходе от виртуального прототипа к натурному образцу.

На этапе A1 создается параметрическая 3D-геометрия изделия, включая корпус, линзы и конструктивные элементы, которые затем используются во всех расчетных модулях. Это позволяет быстро

анализировать влияние изменения размеров, материалов и компоновки на итоговые характеристики прожектора [2].

В блоке А2 выполняется сопряженное моделирование нескольких физических процессов:

- оптический расчет для оценки светового потока и распределения излучения;
- тепловой анализ для определения нагрева и охлаждения;
- прочностной расчет для оценки напряжений, деформаций и виброустойчивости;
- электрический анализ для изучения параметров питания, драйвера и потерь.

Связи между моделями имеют обязательный характер: оптика влияет на тепловыделение, температура воздействует на прочность, деформации могут изменять электрические и геометрические параметры, а электрические режимы, в свою очередь, отражаются на светотехнических характеристиках. Именно поэтому цифровой двойник на этапе проектирования должен быть не набором разрозненных расчетов, а единой взаимосвязанной системой.

На этапе А3 результаты моделирования сравниваются с требованиями технического задания, нормами надежности и заданными допусками. Если выявляется несоответствие, выполняется обратная корректировка геометрии, материалов или конструкции, после чего цикл повторяется

Архитектура модели цифрового двойника

Ключевая задача Design Digital Twin состоит в создании комплексной валидированной математической модели, которая с высокой вероятностью предсказывает поведение реального изделия еще до выпуска первого образца. Такая модель должна поддерживать виртуальные испытания, оптимизацию конструкции, оценку технологичности сборки и подготовку доказательной базы для сертификации [3].

В практической реализации архитектура может быть выстроена через связку CAD- и CAE-инструментов с последующим объединением моделей в системной среде, например в Ansys Twin Builder. При этом геометрия часто передается через STEP или аналогичные форматы, а сложные физические модели переводятся в ROM-описания, чтобы сократить время расчета при сохранении приемлемой точности.

Система функционирует по замкнутому циклу: анализ, проверка, корректировка.

Тем самым получается валидированная и оптимизированная конструкция.

Интеграция компонентов двойника

Объединение всех физических моделей в единую систему производится для эксплуатации в реальном времени или на этапе испытаний

Для интеграции компонентов цифрового двойника используются разные инструменты, каждый из которых отвечает за свой физический домен. Параметрическую геометрию можно разрабатывать в SolidWorks или CATIA, оптические эффекты моделировать в Ansys Speos, теплообмен – в Ansys Fluent, прочность – в Ansys Mechanical, а электрические режимы – в LTspice или MATLAB/Simulink.

Компонент	Роль	Тип интеграции	Ограничение
CAD-система	Формирование геометрии и параметров	STEP, Parasolid, ACIS	Геометрия обычно не переносится напрямую в системную среду
Ansys Speos	Оптическое моделирование	CSV, XML, ROM	Требуется преобразование результатов в аппроксимирующую модель
Ansys Fluent	Тепловой и CFD-анализ	ROM, FMU	Понижается детализация по сравнению с полной 3D-моделью
Ansys Mechanical	Прочностной анализ	ROM, FMU	Используется для передачи деформаций и напряжений в системную модель
MATLAB/Simulink	Алгоритмы управления и регулирования	FMU, LiveLink	Удобен для совместного моделирования и настройки регуляторов
LTspice	Моделирование токового драйвера и потерь	CSV, TXT	Обычно применяется упрощенная модель

Пояснения к терминам в таблице:

ROM (Reduced Order Model, модель пониженного порядка) – упрощённая математическая модель, которая воспроизводит поведение сложной 3D-модели (из Fluent, Mechanical) с достаточной точностью. Создаётся в среде ANSYS Workbench.

FMI/FMU (Functional Mock-up Interface) –открытый стандарт для обмена моделями между различными инструментами моделирования. Модель, экспортированная в формате FMU (Functional Mock-up Unit), может быть импортирована в любой FMI - совместимый инструмент, включая Twin Builder.

APDL (ANSYS Parametric Design Language)– скриптовый язык ANSYS для автоматизации задач. Может использоваться для настройки и запуска расчётов в Mechanical.

LiveLink –технология прямого соединения между двумя программами для обмена данными в режиме реального времени (например, между Twin Builder и Simulink).

Такой подход особенно важен для авиационной техники, где итоговое изделие должно сочетать малую массу, стабильную яркость, тепловую устойчивость и высокую надежность в условиях перегрузок. Использование ROM и FMI/FMU-форматов помогает объединить разнородные инженерные модели в единую вычислительную среду.

Заключение

Создание цифрового двойника на этапе проектирования позволяет сократить число физических прототипов и уменьшить стоимость доводки изделия. Кроме того, появляется возможность заранее оценивать чувствительность прожектора к изменениям материалов, геометрии и условий эксплуатации, а также прогнозировать ресурс светодиодов по тепловым циклам.

Для авиационной отрасли это особенно важно, поскольку испытания натурных образцов дороги, длительны и часто связаны с высокими требованиями к сертификации. Виртуальная валидация в составе Design Digital Twin позволяет перенести значительную часть риска в цифровую среду и принять более обоснованные инженерные решения.

Разработка цифрового двойника авиационного прожектора на этапе проектирования представляет собой междисциплинарную задачу на стыке светотехники, тепломассообмена, прочности, электроники и цифровых инженерных технологий. Предложенный итерационный контур CAD – CAE – валидация – корректировка обеспечивает получение параметрически управляемой и валидированной модели изделия, пригодной для виртуальных испытаний и оптимизации.

Использование ROM-моделей, стандартов FMI/FMU и системной интеграции в среде уровня Twin Builder делает возможным создание практического Design Digital Twin, который помогает снизить количество ошибок проектирования и ускорить переход к работоспособному физическому образцу. Такой подход особенно ценен для сложных изделий авиационного назначения, где необходимо одновременно обеспечить комплекс разнообразных взаимосвязанных физических характеристик, как

в рассмотренном случае авиационного прожектора, где при разработке учитываются световые характеристики, тепловая стабильность, виброустойчивость, масса и электрические параметры.

Список литературы

1. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021.
2. Халютин С. П., Старостин И. Е., Давидов А. О., Харьков В. П., Жмуров Б. В. Цифровые двойники в теории и практике авиационной электроэнергетики // Электричество. 2022. № 10. С. 4–13.
3. Кузнецова С. В., Семенов А. С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. DOI: 10.34759/trd-2023-131-24.

УДК 004.312.44

КОЛОТИЛОВ А. А., КЛИМОВСКИЙ А. Б.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

НЕЧЕТКОЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

***Аннотация.** В статье исследуется концепция арифметико-логического устройства (АЛУ) для применения в нечетких процессорах. Описан формат данных, обрабатываемых таким АЛУ; набор команд, подлежащих реализации; алгоритм вычисления результата. Описана структура флагов АЛУ. Излагаются перспективы применения АЛУ в бортовых системах управления.*

***Ключевые слова:** нечеткий процессор, нечеткие числа, расширенная бинарная арифметическая операция, меры возможности и необходимости.*

Современная система управления летательным аппаратом представляет собой сложную, непрерывно обрабатывающую сигналы датчиков и возвращающую управляющие сигналы на исполняющие устройства систему. Обработка входных сигналов и вычисление значений выходных основана на классической теории управления и двоичной логике. Переменные состояний строго бинарны (0 или 1, «исправен/неисправен»), логика работы описывается уравнениями булевой алгебры и конечными автоматами. Основные законы регулирования линейны, и интегральные, пропорциональные и дифференциальные коэффициенты ПИД-регуляторов переключаются по специальным таблицам. Поведение таких систем может быть полностью описано и проверено средствами формальной верификации, что гарантирует

отсутствие непредвиденных ситуаций, критичных для области пилотируемой авиации.

В промышленности хорошо известны и зарекомендовали себя нечеткие контроллеры Мамдани [1], представляющие собой шаг к управлению в условиях неопределенности и основанные на теории нечетких множеств Заде [2]. Такой контроллер состоит из трех фиксированных этапов: фаззификация (преобразование четких сигналов датчиков в нечеткие), нечеткий логический вывод по строго заданной базе правил «если-то» и дефаззификация (обратное преобразование в четкий управляющий сигнал). Системы управления, основанные на подобных контроллерах, способны сократить количество используемой аппаратуры и обеспечить более плавную смену коэффициентов ПИД-регулятора. Но сертификация таких контроллеров для последующего применения в гражданской авиации является нетривиальной задачей ввиду сложного доказательства непротиворечивости и полноты его базы правил.

Несмотря на сложность внедрения нечетких систем в область гражданской авиации, применение таких систем, а также связанных с ними технологий искусственного интеллекта выглядит перспективным в области беспилотных летательных аппаратов, существенный рост которых в последние годы, накладывает все больше и больше требований к их автономности ввиду ограниченности количества квалифицированных операторов.

Но и аппарат нечетких контроллеров не является исчерпывающим решением. При своей реализации в базисе классических микропроцессоров и микроконтроллеров, ввиду большого количества машинных циклов, требуемых для обработки запрограммированной базы правил, что может быть критичным для самостоятельного выполнения беспилотной системой таких команд, как обход препятствий на высокой скорости. В случае аппаратной реализации нечеткого контроллера, когда базы правил нечеткого логического вывода представлены блоками комбинационной логики [3], произойдет увеличение быстродействия, но ценой отказа от процессорной гибкости системы.

Для сохранения гибкости системы и ее быстродействия для решения задач в условиях неопределенности перспективной является разработка специализированного нечеткого процессора, способного обрабатывать нечеткие числа подобно тому, как классические процессоры обрабатывают классические значения, содержащиеся в регистрах. Принципиальным отличием нечеткого процессора от классических процессоров является обработка нечетких данных за один такт времени.

Нечеткие данные целесообразно представить в качестве упорядоченного набора регистров, старшие регистры которых хранят значения элементов множества, а младшие – их степени принадлежности конкретному нечеткому понятию. Данный дискретизированный формат

позволяет хранить нечеткие множества, нечеткие числа и лингвистические переменные. Таким образом, вместо одного регистра, хранящего значение переменной в классических процессорах, в процессорах нечетких хранение нечеткой переменной осуществляется в группе регистров, что позволит за один такт работы рассматривать не один элемент множества, но все множество целиком, при соблюдении равного количества элементов между разными множествами. Организация данных в нечетком процессоре представлена на рисунке 1.

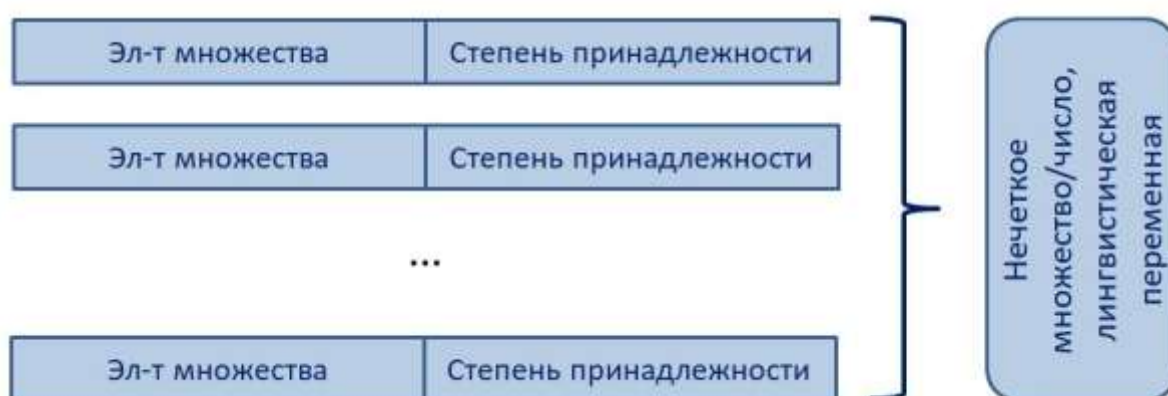


Рисунок 1 – Организация данных в предлагаемом нечетком процессоре

«Сердцем» любого процессора, в котором происходят как арифметические и логические вычисления, так и формирование флагов для управления ветвлением, является арифметико-логическое устройство (АЛУ). Несмотря на кортежную организацию обрабатываемых данных, подобную SIMD-архитектурам векторных процессоров [4], применять методы векторной обработки данных затруднительно ввиду необходимости агрегации результатов нечетких вычислений в соответствии с правилами нечетких логики и арифметики.

Набор операций, реализованных в АЛУ нечеткого процессора должен быть таким, чтобы нечеткий процессор смог выполнить произвольный нечеткий алгоритм, подобно машине Тьюринга для четких алгоритмов. Также необходимо упомянуть об основном свойстве нечетких контроллеров – аппроксимации любой непрерывной функции, что эквивалентно возможности реализовать любую систему нечеткого логического вывода. Таким образом, можно сформировать следующие рекомендации к операциям, реализуемым АЛУ нечеткого процессора:

- 1) Логические: конъюнкция, дизъюнкция и дополнение. В нечеткой логике в качестве конъюнкции используется операция *min*, в качестве дизъюнкции – операция *max*.
- 2) Арифметические: сложение, вычитание и умножение. По расширенной бинарной арифметической операции [книжка Поспелова] возможно вычисление этих операций применительно к нечетким числам.

- 3) Нечеткий логический вывод: правила Мамдани, Заде, Клини-Динса и Лукасевича [5] выбраны, как наиболее простые для реализации в базе логических элементов.

Предлагаемый набор операций, реализуемых АЛУ, приведен в таблице 1.

Кроме проведения вычислений, АЛУ формирует флаги, которые участвуют в организации нечетких ветвлений и нечетких условных переходов. В классических процессорах эти флаги являются битовыми, но для рассматриваемого случая привлекательны многоразрядные флаги, которые могут трактовать собой разные степени достоверности совершения условных переходов, что соответствует смыслу приближенных вычислений. В основе флагов рассматриваемого АЛУ лежат меры возможности Pos и необходимости Nec , основанные на теории возможностей [6]. Именно эти меры (Pos , Nec) становятся флагами для организации нечетких ветвлений и нечетких условных переходов, что позволит строить ветвящиеся алгоритмы при различных степенях соответствия условиям нечетких переходов и ветвлений. На основе этих мер возможно формирование нескольких механизмов нечеткого условного перехода, которые эквивалентны таким операциям для архитектуры RISC-V [7]. Перечень инструкций нечеткого условного перехода приведен в таблице 2.

Таблица 1 – Операции, предлагаемые для реализации в АЛУ нечеткого процессора

№	Операция	Описание операции
1	$\min(A, B)$	Формирует минимум степени принадлежности по нечетким числам A и B
2	$\min(A, \bar{B})$	Формирует минимум степени принадлежности по нечеткому числу A и дополнению нечеткого числа $\bar{B}$
3	$\max(A, B)$	Формирует максимум степени принадлежности по нечетким числам A и B
4	$\max(A, \bar{B})$	Формирует максимум степени принадлежности по нечеткому числу A и дополнению нечеткого числа $\bar{B}$. При установлении в аргумент A пустого множества вычисляет дополнение нечеткого числа $\bar{B}$
5	$add(A, B)$	Сумма нечетких чисел A и B
6	$sub(A, B)$	Разность нечетких чисел A и B
7	$mul(A, B)$	Произведение нечетких чисел A и B

№	Операция	Описание операции
8	$mamd(A, B, A^*)$	Нечеткий логический вывод с импликацией по Мамдани
9	$zadeh(A, B, A^*)$	Нечеткий логический вывод с импликацией по Заде
10	$klini(A, B, A^*)$	Нечеткий логический вывод с импликацией по Клини-Динсу
11	$lukas(A, B, A^*)$	Нечеткий логический вывод с импликацией по Лукасевичу

Таблица 2 – Инструкции, предлагаемые для реализации нечеткого условного перехода

№	Инструкция	Описание инструкции
1	f_bne	Переход, если нечеткие числа A и B (возможно/необходимо) не равны
2	f_beq	Переход, если нечеткие числа A и B (возможно/необходимо) равны
3	f_blt	Переход, если нечеткое число A (возможно/необходимо) меньше нечеткого числа B
4	f_bge	Переход, если нечеткое число A (возможно/необходимо) больше нечеткого числа B или равно ему

Предложенное АЛУ устроено следующим образом:

- 1) три входа для нечетких множеств (чисел) A , B , A^* , каждый из которых представляет собой восемь параллельных 16-разрядных шин, каждая из которых, в свою очередь, отвечает за элемент нечеткого множества, сцепленный с его степенью принадлежности нечеткому множеству;
- 2) шина выбора операции, предназначенная для кодирования выполняемой операции;
- 3) выход нечеткого множества Out , по формату аналогичный входу, описанному в п.1 – предназначен для чтения результата операции, выполненной АЛУ и передачи этого результата на следующие исполнительные узлы нечеткого процессора;
- 4) шины Pos и Nes , выполняющие функции флагов АЛУ для организации нечетких ветвлений и нечетких условных переходов как детерминированная оценка результата сравнения нечетких чисел A и B согласно выбранной инструкции из таблицы 2.

Описанное АЛУ нечеткого процессора способно обеспечить работу всех основных операций нечетких логики и арифметики, а также осуществить процедуру нечеткого логического вывода в течение одного такта сигнала синхронизации, что выгодно отличает его от нечетких систем, реализованных на классических микроконтроллерах и микропроцессорах, по быстродействию. Отличием от нечетких контроллеров будет гибкость, выраженная в возможности динамичной

смены базы правил, а также ветвления между ними, если того требует выполняемая задача. Использование такого нечеткого процессора в системах управления беспилотными летательными аппаратами позволит строить управление такими аппаратами без участия оператора путем использования инструкций вида «если расстояние до препятствия малое и скорость полета высокая, необходимо выполнить маневр уклонения». Такие устройства также способны имитировать поведение опытного пилота при пилотировании гражданского или боевого борта, что позволит повысить безопасность полета после проведения необходимых процедур сертификации.

Список литературы

1. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies, 1975. Vol. 7, No. 1. pp. 1-13.
2. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, No. 3. – pp. 338-353.
3. Береза, А. Н. Аппаратная реализация нечетких контроллеров на ПЛИС / А. Н. Береза, М. В. Ляшов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4(81). – С. 199-204.
4. Хеннеси Джон Л., Паттерсон Дэвид А. Компьютерная архитектура. Количественный подход. Издание 5-е. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 321-344.
5. А. Пегат. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. – 3-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. С. 175-178.
6. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1990. С. 17-20.
7. Сара Л. Харрис, Дэвид Харрис. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V / пер. с англ. В. С. Яценкова, А. Ю. Романова. – М.: ДМК Пресс, 2021. С. 738-746.

УДК 621.396.6-048.24

ГАРАНЖА Е.А., ФОКИН Я.О.

Акционерное общество «Научно производственное предприятие «Завод Искра», г. Ульяновск, Россия

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

***Аннотация.** В статье рассмотрены ключевые аспекты проведения испытаний элементов бортовой электроники, работающих в экстремальных условиях. Проанализированы основные виды воздействий: механические (вибрация, удары) и климатические (температура, влажность). Проанализированы методики контроля работоспособности и выявления скрытых дефектов компонентов на этапах приемо-*

сдаточных и периодических испытаний. Определены критерии оценки надежности и ресурса изделий.

Ключевые слова: *авионика, испытания элементов, надежность, механические воздействия, климатические испытания, качество.*

Сегодняшний этап эволюции радиоэлектроники отмечен ужесточением проблемы надёжности. Это связано с повышением сложности радиоэлектронных систем (РЭС), которое проявляется в значительном росте числа применяемых компонентов и узлов, появлении принципиально новых функций, а также в расширении диапазона эксплуатационных факторов. Технике разного целевого назначения приходится работать в режимах возрастающих нагрузок и решать множество задач. Вследствие этого ужесточаются требования к точности и результативности выполнения предписанных функций – как всей системой в целом, так и каждым её отдельным компонентом. В современном авиастроении уровень автоматизации бортовых систем достиг того, что электроника фактически управляет полетом. Отказ любой части этого контура может привести к катастрофическим последствиям. Анализ авиационных инцидентов показывает, что даже новейшие воздушные суда не застрахованы от проблем с электроникой, вызванных отказом отдельного компонента. Эта реальность жестко диктует требования не только к конечному изделию, но и к каждому элементу его электронной компонентной базы. Наиболее экстремальные условия эксплуатации характерны для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), размещаемой на борту космических аппаратов, ракет-носителей, самолётов, вертолёт, беспилотников.

Под качеством изделий понимается их полное соответствие техническим требованиям, техническим условиям и другой нормативно-технической документации на протяжении всего установленного срока службы.

Надёжность – это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в установленных пределах в течение требуемого промежутка времени или наработки. Для изделий авионики надёжность является критическим параметром, поскольку отказ даже одного элемента может привести к отказу всей системы, а в полёте - к катастрофическим последствиям. [1]

Для подтверждения качества и надежности изделия бортовых электроники подвергают испытаниям – проверяют их функционирование до, в процессе и после различных климатических, механических, а иногда и специальных воздействий. Такие проверки РЭС выполняют на стадии разработки, модернизации и при серийном производстве.

Требования к испытаниям элементов бортовой электроники определяются набором государственных военных и международных

стандартов, которые детально регламентируют методы и условия проверок. Ключевым в России является ГОСТ РВ 20.39.304-98, который устанавливает классификацию, номенклатуру и значения технических требований к стойкости аппаратуры военного назначения, включая авиационную и ракетную технику. Конкретные методы испытаний для проверки соответствия требованиям прописаны в сопутствующих стандартах, таких как ГОСТ РВ 20.57.305, ГОСТ РВ 20.57.306 и др.

К ключевым группам по характеру воздействий испытания делятся на механические, климатические, электрические. [2]

При механических испытаниях проверяют способность конструкции выдерживать нагрузки при эксплуатации и транспортировке. Аппаратуру испытывают на воздействие механических ударов одиночного и многократного действия. Например, согласно ГОСТ РВ 20.39.304, аппаратуру поочередно в шести положениях подвергают трем ударам с пиковым ускорением 15g (для вертолетной аппаратуры – 30g). Форма ударного импульса и его длительность (около 15 мс) также строго регламентированы.

Для выявления критических резонансов и проверки устойчивости компонентов к структурной усталости проводятся испытания на вибропрочность. Уровни вибрации зависят от типа летательного аппарата (самолет, вертолет) и места установки.

Климатические испытания позволяют верифицировать работоспособность аппаратуры при воздействии неблагоприятных погодных факторов и химически активных сред.

Температурные воздействия. Программа проверок включает оценку функционирования изделий в условиях экстремально высоких и низких температур, а также их устойчивость к тепловому удару - внезапному изменению температуры окружающей среды. В соответствии с установленными нормами возможно проведение испытаний при пониженном атмосферном давлении (вплоть до 1 мм рт. ст.).

Влияние влажности и коррозионные процессы. Оценивается способность конструктивных элементов и покрытий противостоять увлажнению, что необходимо для исключения коротких замыканий и подавления коррозионных процессов в материалах. Для блоков, предназначенных для эксплуатации в прибрежной или морской зоне, в обязательном порядке проводятся проверки в камере соляного тумана, которые ускоряют развитие коррозии и позволяют сделать заключение о качестве нанесённых защитных слоёв. Дополнительно могут быть предусмотрены проверки на обледенение, сопротивляемость абразивному действию песчано-пылевых потоков, к плесневым грибам и устойчивость к солнечной радиации (включая ультрафиолетовую составляющую).

Электрические и электромагнитные воздействия. Главной целью данной группы испытаний является проверка электромагнитной

совместимости (ЭМС) аппаратуры и подтверждение её помехоустойчивости. Нормативным документом, регламентирующим соответствующие методики для бортового цифрового оборудования, служит ГОСТ 26807-86. Этот стандарт детально устанавливает порядок проведения лабораторных (стендовых) проверок, позволяющих оценить способность цифровых устройств корректно функционировать при воздействии различных электромагнитных возмущений. Проведение таких испытаний – критически важное условие, обеспечивающее бесперебойную и безаварийную работу бортовых систем связи и навигации, которые не должны давать сбоев под влиянием внутренних или внешних электромагнитных полей.

С точки зрения обеспечения надежности, именно электронная компонентная база является наиболее уязвимой частью любой РЭА. [3] Постоянный анализ отказов РЭА при эксплуатации стабильно показывает, что основная доля отказов приходится именно на отказы элементов, причем их количество значительно превышает число дефектов, обусловленных ошибками конструирования или производства. Этот факт имеет под собой объективные причины: даже качественно изготовленные элементы обладают не абсолютной, а лишь расчетной надежностью, которая зависит от множества факторов, включая внутреннюю структуру, технологию изготовления и реальную электрическую нагрузку.

Более того, практика эксплуатации и расчетов показывает наличие серьезного методологического разрыва. Разработчик РЭА используют в расчетах статистические данные об интенсивности отказов (λ -характеристики), которые, как правило, не гарантируются изготовителями элементов и содержатся лишь в справочных материалах. [4] При этом существует реальный риск, что даже для элемента с известной справочной λ -характеристикой она может ухудшиться из-за смены поставщика материалов, изменения технологии или применяемых материалов. Этот фундаментальный разрыв между расчетной и реальной надежностью делает входной контроль и дополнительные испытания ЭКБ не просто рекомендуемой, а абсолютно обязательной операцией.

Проблема качества и надежности для авионики является настолько критичной, что закреплена в целом ряде нормативных документов. В Российской Федерации базовые требования к качеству ЭКБ для ракетно-космической и авиационной техники регламентируются национальными стандартами, такими как ГОСТ Р 58857-2020, который детально устанавливает номенклатуру основных показателей качества. [5]

Для контроля выполнения этих требований существует многоуровневая система проверок. Центральное место в ней занимает входной контроль (ВК), который представляет собой обязательную процедуру верификации закупленных электронных компонентов с целью отсеять потенциально ненадежные экземпляры перед их установкой в

бортовую аппаратуру. Эта процедура регламентирована специализированными документами такими как ГОСТ РВ 0015-308-2017. [6]

Таким образом, обеспечение качества и надежности РЭА бортовой электроники – это непрерывный процесс, распределенный по всему жизненному циклу. Не менее важным аспектом является требование стандартов к снижению электрических нагрузок и обеспечению оптимальных тепловых режимов для каждого типа компонента, что напрямую влияет на долговечность изделия в целом. Совокупность этих жестких мер – от выбора квалифицированного поставщика до тщательного инструментального контроля – и составляет ту основу, на которой строится итоговая безопасность и надежность полета пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов.

Список литературы

1. Груничев А. С., Кузнецов В. А., Шипов Е. В. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность. – М.: Советское радио, 1969. – 252 с.
2. Гаманюк Д. Н. Испытания электротехнических и электронных изделий // Современная электроника. – 2011. – № 4. – С. 62–69.
3. Севастьянов Н. Н., Андреев А. И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТГУ, 2015. – 266 с.
4. Панкратов Ю. Г., Шур М. С. Организационные вопросы обеспечения надежности радиоэлектронных средств при разработке, производстве и эксплуатации. – Ульяновск: УлГТУ, 1996. – 38 с.
5. Тюлевин С. В. Анализ отказов элементов бортовых радиоэлектронных средств // Наука и инновации в современном мире: техника и технологии: материалы конф. – 2017. – С. 7–31.
6. Усик Н. И., Белоруков А. Э., Василенок А. В. Важность системы менеджмента качества на предприятиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2016. – № 4. – С. 70–77.

УДК 620.165.2:534.8

ГУЩИН С. В., ГЕРАСИМЕНКО Д. А., ЦВЕТКОВ Н. С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

***Аннотация:** В статье изложены и систематизированы физические основы пассивного акустического метода неразрушающего контроля, применяемого для поиска утечек газа в авиационной технике. Рассмотрена цепочка явлений: от хаотического движения отдельных*

молекул газа и формирования направленного потока в трубопроводе до возникновения турбулентных вихрей и их трансформации в акустические волны при истечении через микроскопические дефекты (трещины и малые отверстия). Особое внимание уделено переходу от ламинарного течения к сверхзвуковому истечению и образованию шума. Описаны принципы регистрации сигнала контактными и бесконтактными приборами, а также специфика контроля гермозон фюзеляжа и кабин самолетов.

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль, пассивный метод, утечка газа, турбулентный шум, акустическая эмиссия, ультразвуковой теческатель, истечение газа, герметичность авиационных конструкций, трубопроводы, гермозона.

В современной авиационной промышленности обеспечение герметичности – это вопрос не просто экономии топлива или рабочего тела, а, в первую очередь, безопасности полетов. Надежная герметизация касается как сложной сети трубопроводов, так и замкнутых объемов – гермозон летательного аппарата. В самолете можно выделить несколько ключевых систем, где потеря давления критична:

а) система жизнеобеспечения (при наличии дефекта возможен летальный исход для летного состава и пассажиров вследствие падения парциального давления кислорода, развития гипоксии с потерей сознания в течение 15–40 секунд, последующего удушья и баротравмы лёгких);

б) пневматическая система (дефект приводит к падению давления в приводах, что может вызвать отказ тормозов, механизмов выпуска/уборки шасси и закрылков, а также неконтролируемый рост оборотов двигателя);

в) топливная система (при дефекте возникают утечка топлива, падение давления в магистрали, что способно спровоцировать помпаж или остановку двигателя, а также пожар при контакте с высокотемпературными элементами конструкции).

Нарушение целостности этих контуров из-за микротрещин, неплотности соединений или коррозии ведет к утечкам. Для их обнаружения без разборки агрегатов и остановки эксплуатации идеально подходят методы неразрушающего контроля [1].

Неразрушающий контроль представляет собой совокупность методов оценки свойств материала или конструкции без нарушения их целостности и пригодности к дальнейшей работе [1]. Акустический метод контроля, в свою очередь, основан на регистрации упругих волн, возникающих в объекте [2]. Он подразделяется на активный и пассивный, хотя граница между ними не всегда очевидна. Активный метод характеризуется облучением исследуемого объекта и анализом отраженных волн. Пассивный акустический метод применительно к контролю герметичности – это метод «прослушивания»: сигнал не излучается, а улавливается шум, создаваемый самой утечкой газа, истекающего через дефект [3]. Метод

включает три основных подвида: вибрационно-диагностический (измеряется вибрация механизма, по спектру выявляются биения и дисбаланс), шумодиагностический (анализируется акустический шум работающего агрегата, изменение громкости или тональности указывает на повреждение) и акустико-эмиссионный (регистрируются упругие волны, излучаемые растущими трещинами) [2]. Стоит отметить, что перед проверкой объект чаще всего накачивают каким-либо рабочим телом (газом), для создания перепада давления, чтобы утечка давала слышимый шум. Исключением являются объекты, внутри которого уже есть избыточное давление от работы системы.

Чтобы понять, как работает течеискатель, проследим весь путь газа, начиная с молекул и заканчивая исходящим потоком.

В газах силы сцепления между молекулами пренебрежимо малы. Согласно молекулярно-кинетической теории, молекулы газа находятся в непрерывном хаотическом движении, скорость которого определяется температурой [4]. Например, при комнатной температуре средняя скорость молекул воздуха составляет около 460 м/с, что превышает скорость звука. Однако из-за частых столкновений (длина свободного пробега при атмосферном давлении составляет порядка 60 нанометров) молекулы быстро меняют направление, создавая равномерное давление на стенки сосуда [4]. Давление газа – это интегральный результат бесчисленных ударов молекул о поверхность. Внутри авиационного трубопровода концентрация молекул весьма высока. При появлении сквозного дефекта – трещины или малого отверстия – возникает градиент давления: с одной стороны стенки высокая концентрация быстрых молекул, с другой – значительно более разреженная среда [5] (см. рис.1). Молекулы, движущиеся в направлении отверстия, практически не испытывают сопротивления со стороны соседей, поэтому начинают ускоряться под действием перепада давления. Важно различать молекулярный и гидродинамический режимы истечения. Молекулярный режим реализуется, когда размер отверстия меньше средней длины свободного пробега молекул (характерно для космических аппаратов). В этом случае молекулы вылетают независимо друг от друга, не сталкиваясь в области отверстия, и акустический шум практически отсутствует. Однако в авиационных системах, работающих при нормальных и высоких давлениях, размеры дефектов многократно превышают длину свободного пробега. Поэтому истечение происходит, подчиняясь законам газовой динамики.

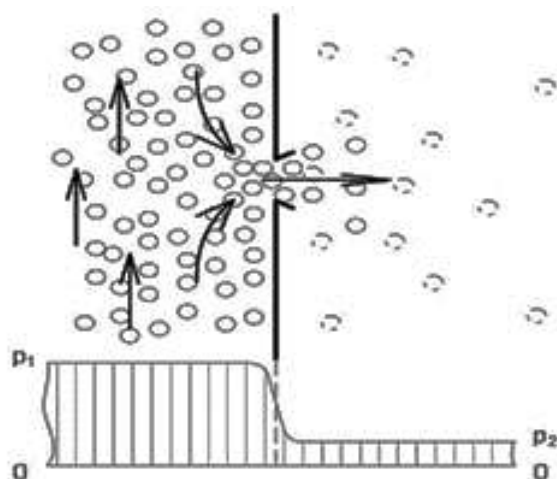


Рисунок 1 – Градиент давлений при сквозном дефекте

Внутри целой трубы поток газа организован: он течет либо спокойными слоями, либо хаотично интенсивно перемешиваясь в объеме [5]. Однако при наличии сквозного отверстия картина резко меняется. Давление внутри трубы и снаружи создают движущую силу, под действием которой газ устремляется в отверстие. На входе в отверстие линии тока искривляются, поток сжимается, и минимальное сечение струи, называемое «горлом», оказывается несколько меньше геометрического сечения отверстия. При малом перепаде давлений истечение происходит с дозвуковой скоростью, но по мере снижения внешнего давления скорость газа в горле струи растет. Когда перепад достигает критического значения, скорость в горле становится равна местной скорости звука [5].

Если перепад давлений сверхкритический, то за отверстием газ, выходящий со звуковой скоростью, попадает в область с более низким давлением. Для выравнивания давления струя продолжает расширяться и ускоряться до сверхзвуковых скоростей. В сверхзвуковом потоке возникают периодические скачки уплотнения и волны разрежения, известные в форме «дисков Маха» [6]. Именно в этой области происходит самое интенсивное перемешивание быстрого газа с окружающим неподвижным воздухом. На границе струи формируется сдвиговый слой – зона с огромным градиентом скорости. Любое малое возмущение в этом слое приводит к его скручиванию и образованию вихрей. Этот процесс называется неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца [7]. Вихри растут, взаимодействуют друг с другом, образуют широкий спектр турбулентных пульсаций. Важно подчеркнуть, что даже если течение внутри трубы было ламинарным, на выходе из отверстия оно всегда становится турбулентным из-за огромных сдвиговых напряжений и скачков давления [7].

Турбулентный поток, состоящий из хаотически движущихся вихрей разных размеров, является источником акустических волн. Согласно теории Лайтхилла, турбулентные пульсации являются мощнейшими источниками звука [8]. Они действуют подобно распределенным

акустическим источникам типа квадруполь, что генерирует звук не просто пульсацией объема и не колебанием силы, а взаимодействием напряжений внутри самой среды. Вихри сжимают и разрезают воздух, генерируя акустические волны. Вышеописанные «диски Маха» генерируют особенно громкий и высокочастотный свист. Стоит отметить пару следствий из теории Лайтхилла. Первое – интенсивность звука зависима от скорости струи. Акустическая мощность, излучаемая турбулентной струей, пропорциональна восьмой степени скорости истечения (в некоторых режимах – четвертой–восьмой степени), что объясняет, почему даже небольшое увеличение перепада давления приводит к резкому росту уровня шума, то есть утечка, едва слышимая при 2 атмосферах, становится оглушительной при 4 атмосферах [9]. Второе – турбулентность содержит вихри самых разных масштабов. Каждый вихрь генерирует звук на своей характерной частоте. В результате спектр шума утечки является непрерывным и простирается от единиц герц до сотен килогерц [6]. Кроме теории Лайтхилла, стоит отметить классическую демонстрацию связи звука и истечения газа, но в обратном направлении. В опыте с «трубой Рубенса» стоячая звуковая волна в трубе с отверстиями модулирует давление газа, вызывая изменение высоты пламени [10]. Это наглядно показывает, что акустические колебания и газодинамические процессы связаны: как звук может влиять на поток, так и поток рождает звук.

Сгенерированные в струе акустические волны распространяются в окружающем воздухе (см. рис. 2). Ультразвуковые частоты (20 кГц и выше) имеют длину волны менее 1,7 см, отчего появляется возможность с высокой точностью локализовать источник, так как ультразвук распространяется узким лучом.

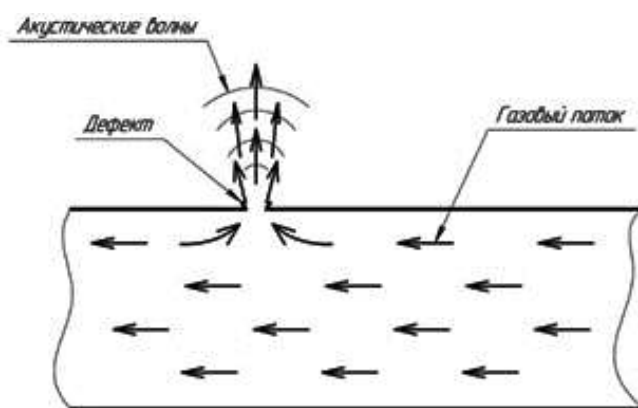


Рисунок 2 – Преобразование струи в акустические волны

Кроме того, в ультразвуковом диапазоне наблюдается высокое затухание в воздухе: коэффициент поглощения растет пропорционально квадрату частоты [12]. Это означает, что удаленные промышленные шумы

в ультразвуковом диапазоне практически не слышны, что резко повышает помехоустойчивость метода. Бесконтактные акустические течеискатели оснащаются направленными микрофонами или пьезоэлектрическими приемниками с параболическими рефлекторами. Они собирают ультразвуковой сигнал с расстояния до нескольких десятков метров (в тихой обстановке) и преобразуют его с помощью гетеродинирования в слышимый диапазон. Оператор в наушниках слышит характерное шипение или свист, амплитуда которого растет по мере приближения к дефекту.

Часть энергии турбулентных пульсаций передается непосредственно на кромки дефекта и стенку трубы (см. рис. 3). Высокочастотные колебания давления, ударяющие в края трещины, возбуждают в материале упругие волны – продольные, поперечные и поверхностные [2]. Структурный шум распространяется по металлу на значительные расстояния, поскольку затухание ультразвука в стали или алюминии значительно меньше, чем в воздухе [3]. На частотах 20–100 кГц амплитуда волны в трубе может сохраняться на десятках метров, что позволяет устанавливать стационарные датчики для мониторинга протяженных трубопроводных магистралей.

Контактный датчик течеискателя представляет собой пьезоэлектрический преобразователь, прижимаемый к поверхности. Пьезокерамический элемент преобразует механические колебания поверхности в электрический сигнал благодаря пьезоэффекту [11]. Поскольку амплитуда вибраций, вызванных утечкой, крайне мала, сигнал подвергается значительному усилению и фильтрации. Современные приборы используют цифровую обработку для выделения характерного «почерка» утечки на фоне вибраций от работающих насосов или гидроударов. Следует отметить явление конвективного усиления: акустические волны, распространяющиеся по трубе навстречу потоку газа, усиливаются за счет взаимодействия со средой, что может влиять на точность корреляционных измерений.

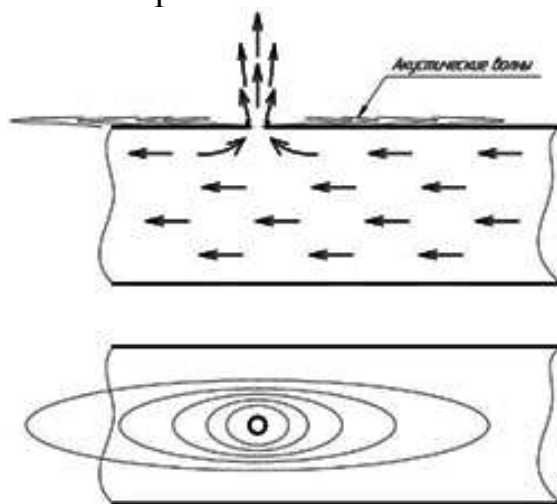


Рисунок 3 – Распространение волны по поверхности трубопровода

Наконец, акустическая волна распространяется внутрь трубы (см. рис. 4), навстречу потоку газа. Этот сигнал могут улавливать стационарные датчики, вмонтированные в магистраль. Более того, в корреляционных течеискателях два датчика, установленных по краям трубы, сравнивают время прихода этого внутреннего шума. Зная скорость звука в газе и разницу во времени, автоматика с высокой точностью вычисляет координату дефекта, даже если труба скрыта под обшивкой или теплоизоляцией.

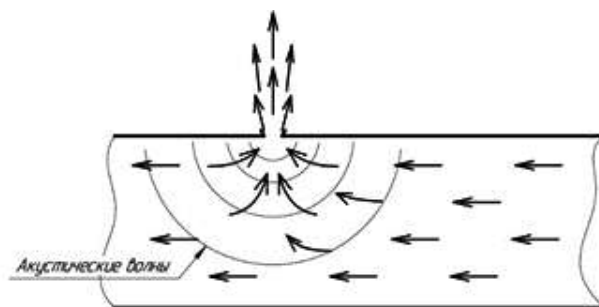


Рисунок 4 – Распространение волны внутри трубопровода

Принципиально процесс истечения через дефект в обшивке фюзеляжа или остеклении кабины не отличается от истечения через отверстие в трубе. Отличие заключается в том, что внутри гермозоны отсутствует направленное течение газа вдоль стенки, то есть давление статично, а объем воздуха велик. Однако при появлении сквозного дефекта под действием перепада давления (внутреннее избыточное давление и за бортом) воздух устремляется наружу с формированием струи, турбулентности и ультразвукового шума.

Особенностью дефектов в обшивке является их разнообразная геометрия: это могут быть усталостные трещины в районе заклепочных швов, неплотности в уплотнителях дверей и люков, микротрещины в остеклении кабины. Каждый тип дефекта создает свой «акустический портрет» [3]. Например, узкая щель генерирует более высокочастотный шум, чем круглое отверстие того же проходного сечения, из-за влияния краевых эффектов и дополнительной турбулизации потока. Пористая неплотность (например, в клеевом шве) создает распределенный источник с более низкой интенсивностью, но широкой диаграммой направленности.

Важно понимать практическое различие. В трубопроводе даже малейшая утечка недопустима, так как может привести к пожару или отказу системы. В гермозоне же абсолютная герметичность недостижима и не требуется. Воздух в салоне постоянно обновляется системой кондиционирования, и небольшой отток через дренажные отверстия и неплотности считается нормой. При проверке герметичности фюзеляжа на земле его наддувают до определенного значения и контролируют скорость падения давления. Например, падение давления не должно превышать 3

кПа за 20 минут. Если давление падает быстрее нормы, применяется акустический метод для поиска конкретного свища сверхнормативной утечки.

Акустический метод используется как на этапе производства, так и во время эксплуатации и капитального ремонта авиатехники [2]. При «тяжелых» формах обслуживания обязательной является проверка герметичности всех критических зон и трубопроводных магистралей. Метод ценен тем, что позволяет выявить развивающийся сквозной дефект задолго до того, как он станет видимым глазу или приведет к опасной вибрации конструкции.

Таким образом, акустический метод неразрушающего контроля герметичности является ярким примером того, как фундаментальные физические законы – от хаоса молекулярного движения до строгих уравнений газодинамики и аэроакустики – находят прямое инженерное применение, обеспечивая надежность и безопасность каждого полета воздушного судна.

Список литературы

1. Ключев В.В. (ред.). Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. и др. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Под ред. Л.Н. Степановой. – М.: Машиностроение, 2008. – 439 с.
3. Иванов В.И., Бигус Г.А., Власов И.Э. Акустическая эмиссия: Учебное пособие. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 192 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том II. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2005. – 544 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. – 5-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
6. Глазнев В.Н., Запругаев В.И., Усков В.Н. и др. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 194 с.
7. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – Перевод с английского В.П. Вахомчика и А.С. Попова под редакцией Г.Ю. Степанова. М.: Мир, 1973. – 758 с.
8. Lighthill M.J. On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1952. – Vol. 211. – P. 564–587.
9. Lighthill M.J. On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1954. – Vol. 222. – P. 1–32.
10. Gee K.L. The Rubens Tube // Proceedings of Meetings on Acoustics. – 2009. – Vol. 8, No. 1. – 025003.
11. Голямина И.П. (ред.). Ультразвук: Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
12. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984. – 400 с.

УДК 681.518.5

ЖЕМАЕВА Д.А., ГЕВАК Н.В.

Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА), г. Москва, Россия

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЭО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ

***Аннотация.** В рамках статьи предложена методика исследования радиоэлектронного оборудования при решении задач диагностирования, рассмотрены основные этапы и используемый математический аппарат.*

***Ключевые слова:** техническое диагностирование, радиоэлектронные системы, графоаналитическое моделирование.*

Безотказность бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) является одним из ключевых показателей, определяющих надежность авиационных систем в гражданской авиации. Одной из составляющей комплекса мероприятий профилактики отказов технических систем является техническое диагностирование [1].

С точки зрения обеспечения высокого уровня безопасности полетов (БП) вся совокупность протекающих процессов и событий может рассматриваться в рамках понятия «авиационно-транспортная система» (АТС).

Решение задач обеспечения БП требует применения методов комплексной оценки степени влияния различных факторов. Технический фактор в АТС играет важную роль при реализации и контроле процессов управления системой. Отказы, возникающие при эксплуатации средств БРЭО, составляют непосредственную угрозу возникновения авиационных событий, ввиду неполноты и некорректности предоставляемой информации для реализации управляющих воздействий.

Кроме того, эксплуатационная надежность изделий определяется организацией технического обслуживания (ТО). Классический подход основан на статистической теории надежности, позволяет планировать стратегии обслуживания в среднем для партии идентичных типов БРЭО и не гарантирует оптимальное обслуживание каждого отдельного изделия. Однако статистические данные показывают, что отказы РЭО происходят как в период назначенного ресурса, так и за его пределами. Поэтому наблюдается устойчиво растущая потребность в разработке методов ТО каждого конкретного образца техники по его фактическому состоянию.

Современная концепция организации технической эксплуатации и обслуживания систем БРЭО основана на идеях, предусматривающих такую организацию управления, при которой появление отказов

(дефектов) оборудования предупреждается, а не фиксируется при диагностике и контроле функционального состояния оборудования или непосредственно в процессе его эксплуатации.

Таким образом, остается актуальной проблема обеспечения надежности авиационной техники, оценки технического состояния объектов и совершенствования систем диагностирования.

Целью данной работы будет служить составление методики исследования, результатом которого будет являться получение аналитической зависимости между показателями безопасности системы и объемом диагностических параметров.

Основополагающим этапом решения задачи определения технического состояния является формализация протекающих в нем процессов и описание диагностической модели. Наличие модели позволяет решить ряд задач, определяющих качество и эффективность диагностирования. Основная из них связана с выбором множества диагностических параметров, обеспечивающих выполнение следующих требований:

- охват всех возможных неисправностей;
- минимизация числа контролируемых параметров;
- максимизация достоверности полученных результатов за счет соответствующего выбора параметров по показателям информативности и различительной способности [2,3].

Современные авиационные технические системы отличаются сложностью реализации и многообразием выполняемых задач. Указанные условия накладывают определенные требования к представлению диагностической модели. При разработке диагностического обеспечения достаточно часто используют модель в виде ориентированного графа, отражающего причинно-следственные связи в системе. Математический аппарат теории графов позволяет рассматривать отношения либо на множестве свойств функционирования объекта диагностики, либо на множестве его параметров, либо на множестве его функциональных элементов. Графоаналитический подход также позволяет масштабировать модель, адаптируя ее под объем решаемой задачи и глубину поиска места отказа. Граф-моделью РЭО называется граф вида:

$$G(X, U),$$

где $X = \bigcup_i x_i; i = \overline{1, n}; X \neq \emptyset$ - множество вершин, $U = \bigcup_{i,j} \{x_i x_j\}; i, j = \overline{1, n}; U = \emptyset$ - множество ребер [4].

Также техническое диагностирование может рассматриваться как часть более общей теории – теории распознавания образов. В данном случае каждому из выявленных состояний объекта ставится в соответствие отказ или их набор. Решение задачи классификации будет качественно зависеть от полноты описываемых классов состояний и границ классов.

При решении задачи классификации выделяют два основных способа описания характера границ между классами: допусковый подход и подход, учитывающий нелинейность границ.

При выборе алгоритма распознавания необходимо учесть, что для ряда приложений не могут быть использованы параметрические методы распознавания образов, при которых обучение преследует цель построение дискриминантной функции при известных параметрах распределения значений признаков. Непригодными могут оказаться и алгоритмы обучения для дискретных признаков, требующих статистической независимости [5].

В данном случае целесообразно выбрать непараметрический метод распознавания с априорным выбором дискриминантной функции. Обучение будет состоять в нахождении весовых коэффициентов, позволяющий трансформировать общий вид функции под заданные требования. Для реализации алгебраического метода применительно к этому подходу необходимо произвести минимизацию эффективного набора диагностических параметров.

Перед решением задачи распознавания образов распознающий алгоритм должен быть соответственно обучен. Для этого в свою очередь необходима обучающая статистика (обучающая последовательность). Выборкой могут служить таблицы классов состояний при выполнении следующих условий:

- признаки должны соотноситься с заранее выбранными и обоснованными диагностическими параметрами;
- реализации должны быть верифицированы, т.е. доказана достоверная принадлежность к классу;
- реализации не должны повторяться как в рамках одного класса, так и между ними.

В данном случае, может быть предложена следующая методика распознавания:

- составление эталонных таблиц классов ТС БРЭО на основе верифицированных наборов значений бинарных информативных признаков диагностических параметров;
- определение количества и состава тупиковых тестов;
- расчет весов признаков (весовых коэффициентов дискриминантной функции);
- оценка гарантированной достоверности распознавания.

При решении задачи диагностирования и дихотомической задачи распознавания в частности имеется целое множество классов технических состояний. Каждый класс включает в себя некоторое число отдельных технических состояний, называемых реализациями. Множество реализаций класса i может быть представлено в виде:

$$M^i = \{m_1^i, m_2^i, \dots, m_n^i\},$$

где n – число реализаций класса i .

Реализации отличаются между собой как в рамках одного класса, так и между классами конкретными значениями характеризующих их диагностических параметров $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k)$.

Осуществив переход от пространства параметров в пространство признаков, реализации каждого класса могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} m_1^i &= \langle \alpha_{11}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{w1} \rangle \\ m_2^i &= \langle \alpha_{12}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{w2} \rangle \\ &\dots \\ m_j^i &= \langle \alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{wj} \rangle \\ &\dots \\ m_n^i &= \langle \alpha_{1n}, \alpha_{2n}, \dots, \alpha_{wn} \rangle \end{aligned} \right\},$$

где каждая реализация $\{m_j^i\}$ представляется набором признаков α_j . Приведенное выше выражение может быть соответствующим образом представлено в виде матрицы.

Такой подход может быть положен в основу определения области работоспособности с учетом требований безопасности. В данном случае будет осуществлено преобразование области безопасности из определяющих параметров в область диагностических. Необходимость преобразования обуславливает наличие методической погрешности и возможность ее уменьшения.

Построение модели с помощью методов теории планирования эксперимента предусматривает выполнение следующих этапов:

- выбор факторов эксперимента;
- построение плана эксперимента;
- проведение натурного эксперимента;
- решение уравнения регрессии;
- оценку значимости коэффициентов уравнения регрессии;
- оценку адекватности модели [6].

Получение аналитической зависимости возможно с использованием методов регрессионного анализа в классе алгебраических полиномов вида:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{B},$$

где $\mathbf{Y}$ – функция отклика, $\mathbf{X}$ – матрица плана; $\mathbf{B}$ – вектор коэффициентов уравнения регрессии.

После нахождения вектора коэффициентов регрессии модель описывается в виде алгебраического полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1; i \leq j}^k b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i_1, i_2, \dots, i_k; (\sum i_j = p)}^k b_{i_1, i_2, \dots, i_k} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_k^{i_k}.$$

Рассмотрев теоретические аспекты моделирования при решении задач диагностирования, сформирована методика проводимого исследования, структура которой графически представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема исследования

По результатам исследования и выполнения всех этапов алгоритма планируется formalizovat' решение задачи диагностирования технического состояния сложного технического объекта с целью обеспечения высокого уровня безопасности полетов. Особый интерес в работе представит варьирование коэффициентов значимости факторов условий измерений и определение взаимосвязи между значениями коэффициентов и результатами диагностирования.

Список литературы

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. 1987.
2. Основы технической диагностики. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. Под ред. П.П. Пархоменко. – М. Энергия. 1976.
3. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем. - М.: Издательский центр «Академия», 2009

4. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники/Я.Я. Осис, Я.А. Гельфандбейн, З.П. Маркович, Н.В. Новожилова. - М.: Транспорт, 1991. - 244 с.

5. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

6. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин; Под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.

УДК 004.932

КИНДЕЕВ А.Д., ШИШКИН В.В.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

АНАЛИЗ СЛОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОТОКЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ БОРТОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

***Аннотация.** Рассматривается сложности обнаружения объектов в видеопотоке в реальном времени, в частности малым и плотно расположенным целям. Представлена структура конвейера обработки. Выполнено сравнение методов обнаружения. Предлагается дальнейшие исследования связать с оптимизацией современных гибридных архитектур для повышения качества обнаружения, в частности RT-DETR.*

***Ключевые слова:** Обнаружение объектов, видеопоток, реальное время, бортовые летательные аппараты, БПЛА, малые объекты, плотные сцены, аффинные преобразования, Viola–Jones, CV, ML, DL, CNN, DETR, RT-DETR.*

Актуальность задачи

Задача обнаружения объектов в видеопотоке в режиме реального времени является одной из ключевых для навигации систем летательных аппаратов, но несмотря на это является не полностью решенной. Наиболее выделяются сложности, связанные с исходным видеопотоком и доступными аппаратными возможностями:

Сценарии обнаружения характеризуются объектами малого размера с низким пространственным разрешением и слабым контрастом, частыми взаимными пересечениями, высокой степенью сходства визуальных признаков и различными аффинными искажениями [1]. Целевые объекты детекции обычно характеризуется высокой вариативностью, их визуальные свойства существенно зависят от класса летательного аппарата, высоты и скорости полёта, особенностями фона, а также цели полета.

Существенным фактором является ограниченность вычислительных ресурсов, используемых в бортовых системах, которая накладывает жёсткие требования на вычислительную сложность алгоритмов, вызывает задержки обработки и использует пониженное энергопотребление [2].

Исследование моделей, методов и инструментальных средств для эффективного обнаружения объектов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и высокой вариативности видеопотока является актуальной задачей современной авиации, особенно в контексте применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Надёжная работа таких алгоритмов критически важна для обеспечения безопасности и функциональности бортовых систем, позволяя выполнять задачи навигации, наблюдения и мониторинга в реальном времени.

Вариативность платформ летательных аппаратов

Системы обнаружения объектов не обладают универсальностью: требования к алгоритмам детекции объектов, составу целевых классов и доступным вычислительным ресурсам существенно различаются в зависимости от класса летательного аппарата: беспилотники [3] и вертолеты.

В контексте задачи обнаружения объектов целевые платформы можно классифицировать по ключевым эксплуатационным параметрам, включая взлётную массу, дальность действия, высоту полёта и доступные вычислительные ресурсы на борту. Указанные характеристики определяют как условия формирования входных данных (пространственное разрешение, масштаб объектов, уровень шумов и динамика сцены), так и допустимую вычислительную сложность применяемых алгоритмов.

Сводное сравнение ключевых параметров, значимых для задачи детекции объектов, представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение ключевых параметров для задачи обнаружения

Параметр	Малые БПЛА	Тактические и стратегические БПЛА	Вертолёты
Высота полёта	до 250-300 м	до 20000 м	до 3000 м
Среда наблюдения	городская и промышленная среда, иногда сельская местность	смешанная среда	смешанная среда
Масштаб сцены	локальная	глобальная	глобальная
Типичные целевые объекты	пешеходы, транспортные средства, элементы инфраструктуры	наземная техника, объекты инфраструктуры, скопление людей	группы людей, наземная и водная техника, очаги возгораний, инфраструктура
Характерный размер объекта	20–100 пх	5-20 пх	40-200 пх
Стабилизация	низкая	средняя	высокая
Типы сенсоров	RGB	RGB, мультиспектр	RGB, мультиспектр
Вычислительный ресурс	жёсткие ограничения	бортовой GPU или наземная станция	бортовой GPU или наземная станция

Параметр	Малые БПЛА	Тактические и стратегические БПЛА	Вертолёт
Типичные алгоритмы детекторов	классические алгоритмы компьютерного зрения (CV) и облегченные архитектуры машинного обучения (ML) решения	легковесные сверточные сети (CNN) и некоторые архитектуры трансформеров	полноценные ViT [4], DETR, RT-DETR [5] и CNN решения.
Ключевые алгоритмические ограничения	ограниченная производительность, наличие малых объектов	сверхмалые объекты, дефицит релевантных наборов данных	объединения информации с сенсоров, много малых объектов

Сравнение демонстрирует, что не существует универсального алгоритма детекции объектов, одинаково эффективного для всех платформ: каждая тип летального аппарата предъявляет специфические требования к вычислительному ресурсу, составу сенсоров и архитектуре конвейера обработки. Это обуславливает необходимость точного выделения этапов обработки видеопотока с целью нахождения эффективных способов преодоления выявленных ограничений.

Семантическая обработка изображений

В процессе обработки осуществляется переход от пиксельного представления входного изображения к семантически насыщенному описанию изображения, включающему локализацию объектов и оценку их принадлежности к классам.

Формальная постановка задачи:

Входное изображение задается функцией $I: \Omega \rightarrow [0,1]^C$, где множество $\Omega = \{(x,y): x \in Z, y \in Z\}$, а x и y координаты пикселей на изображении. Область значений $[0,1]^C$ получается линейным масштабированием из $[0, 2^b - 1]$, где b – битовая глубина на канал.

Тогда семантическая обработка реализуется композицией трёх функциональных блоков: $I \xrightarrow{Backbone} F \xrightarrow{Neck} \tilde{F} \xrightarrow{Head} D$, где

Оператор *Backbone* извлекает признаки на различных масштабах изображения;

Оператор *Neck* агрегирует и выравнивает многомасштабные признаки F . Является опциональным оператором обработки, зависит от оператора *Backbone* [6];

Оператор *Head* формирует предсказания D .

Результатом работы детектора является множество предсказаний D :

$D = \{(box_i, class_i, score_i)\}_{i=1}^K$, где

K – количество распознанных объектов;

$box_i \in I$ – параметры ограничивающего прямоугольника (bounding box), обычно $(x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max})$;

$class_i \in \{1, \dots, C\}$ – индекс предсказанного класса;

$score_i \in [0,1]$ – оценка уверенности для пересказанного объекта.

До этапа постобработки множество D содержит избыточные и взаимно перекрывающиеся ограничивающие прямоугольники. Обычно для их устранения применяются методы подавление дубликатов[7].

Существующие конвейеры предполагают два основных варианта реализации:

Методы с ручным извлечением признаков (hand-crafted features):

Основаны на использовании заранее заданных параметров для *Backbone* (SIFT, HOG, Viola–Jones), а предсказания (*Head*) через машинное обучение (SVM, AdaBoost);

1) Методы глубокого обучения представлению (Deep Learning):

Предполагают обучение представлению и функции предсказания в рамках единой нейросетевой архитектуры (end to end). К этим методам относятся современные детекторы объектов (YOLO, SSD, DETR), использующие свертки в слоях и основанные на трансформерах (ViT) архитектуры.

В таблице 2 представлен сравнительный анализ существующих связей методов в конвейере обработки видеопотока. Описаны наиболее популярные и эффективные связки операторов backbone, neck и head по критериям, которые свойственны видеопотоку с бортовых летательных аппаратов.

Таблица 2 – Сравнительный анализ существующих подходов для обнаружения

Метод/ критерии	Мало исходных данных	Мелкие объекты	Реальное время	Аффинные преобразо- вания	Разный масштаб	Сложный фон	Много объектов
Классические подходы							
Viola- Jones + AdaBoost	хорошо	плохо	хорошо	плохо	плохо	плохо	умеренно
HOG + SVM	хорошо	плохо	умеренно	умеренно	плохо	умеренно	умеренно
SURF/ ORB + SVM	хорошо	плохо	умеренно	только повороты и сдвиги	умеренно	умеренно	плохо
Одноэтапные подходы свёрточных сетей							
Mobile Net + FPN + SSD	плохо*	умеренно *	хорошо	хорошо	хорошо	хорошо	плохо
ResNet + FPN + YOLO	плохо*	умеренно *	умеренно	хорошо	хорошо	хорошо	плохо
Двухэтапные подходы свёрточных сетей							
ResNet + FPN + R-CNN	плохо*	хорошо*	плохо	хорошо	хорошо	умеренно	плохо
Подходы на основе трансформеров							

Метод/ критерии	Мало исходных данных	Мелкие объекты	Реальное время	Аффинные преобразо- вания	Разный масштаб	Сложный фон	Много объектов
ResNet + FPN + ViT	плохо	хорошо	плохо	хорошо	хорошо	хорошо	хорошо
DETR	плохо	умеренно	плохо	хорошо	умеренно	хорошо	умеренно *
RT-DETR [8]	плохо	умеренно	хорошо	хорошо	умеренно	хорошо	умеренно *

Заключение

Проведённый анализ показывает, что данная задача актуальна в настоящее время. Ограниченность в аппаратной части и специфичность целей для обнаружения не позволяют применить «эталонные» подходы, которые являются стандартом для областей отличных от аэрофотосъёмки. Разнообразие существующих платформ летальных аппаратов с различными характеристиками и задачами задает дополнительные трудности в связи с чем нужно применить формальное описание данной задачи для выделения слабые мест известных подходов.

Сравнительный анализ показывает, что наибольшую практическую эффективность демонстрируют гибридные методы, сочетающие преимущества различных архитектур и алгоритмических стратегий. В сообществе исследователей наблюдается устойчивый переход от классических моделей к композиции облегченных трансформеров со свёрточными архитектурами и их оптимизации: например, RT-DETR, который обеспечивает использование глобального контекста сцены при сохранении приемлемой вычислительной сложности.

Список литературы

1. Пастушков А.В. Метод и алгоритмы поиска объекта в видеопотоке, Томск, диссертация, 2017.
2. <https://radxa.com/products/rock3/3a/> [Электронный ресурс] // Веб-сайт Radxa Rock 3A: [сайт]. URL: <https://radxa.com/products/rock3/3a/> (дата обращения: 14.04.2026).
3. БПЛА: классификация, типы, сферы применения [Электронный ресурс] // 3mx.ru: [сайт]. URL: <https://3mx.ru/articles/bpla-konstruktsiya-tipy-sfery-primeneniya/> (дата обращения: 14.04.2026).
4. Transformers for Image Recognition [Электронный ресурс] // arxiv.org: [сайт]. [2021]. URL: <https://arxiv.org/pdf/2010.11929> (дата обращения: 14.04.2026).
5. DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection [Электронный ресурс] // arxiv.org: [сайт]. [2024]. URL: <https://arxiv.org/pdf/2304.08069> (дата обращения: 14.04.2026).
6. Feature Pyramid Networks for Object Detection [Электронный ресурс] // arxiv.org: [сайт]. [2017]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1612.03144> (дата обращения: 14.04.2026). Efficient Non-Maximum Suppression [Электронный ресурс] // www.researchgate.net: [сайт]. [2006]. URL: https://www.researchgate.net/publication/220929789_Efficient_Non-Maximum_Suppression (дата обращения: 14.04.2026).

7. RT-DETRv3 [Электронный ресурс] // arxiv.org: [сайт]. [2024]. URL: <https://arxiv.org/pdf/2409.08475> (дата обращения: 14.04.2026).

УДК 629.7.018:519.876.5

КОМИССАРОВ А.В., УСАЛЕВА С.А.

АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», г. Ульяновск, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ЭТАПЕ ОСВОЕНИЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АВИАЦИОННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

***Аннотация:** в данной статье описана математическая модель управления качеством конструкторской документации в процессе освоения серийного производства авиационного бортового электронного оборудования на основе моделей Джелинского–Моранды и Шика-Волвертона. Особое внимание уделяется описанию процесса обнаружения, классификации и корректировки несоответствий конструкторской документации как ключевого элемента системы управления качеством. Предлагается математический аппарат для прогнозирования скорости устранения выявленных несоответствий конструкторской документации и стоимости доработок с оценкой их рисков в ходе производственного цикла.*

***Ключевые слова:** качество конструкторской документации, авиационное бортовое электронное оборудование, постановка на серийное производство, модель оптимизации, управляющие воздействия.*

Рост научно-технических знаний и усложнение требований, предъявляемых к выпускаемому авиационному бортовому электронному оборудованию (БЭО), привели к возрастанию объемов и сложности как научно-исследовательских опытно-конструкторских работ (НИОКР), так производственного цикла изготовления. Существенно усложнившийся процесс освоения производства БЭО на примере самолетов МС-21, Ил-114-300 и SJ-100 показал, что имеются проблемы в изготовлении комплектующих для отечественных самолётов [4]. Неготовность промышленного производства России к серийному выпуску гражданских самолетов существенно изменило ~~проектные~~ планы по обеспечению авиационного парка страны современными лайнерами с учетом действующего санкционного запрета на поставку коммерческих самолетов (таблицы 1). На начало 2026 года план по выпуску самолетов МС-21 и Ту-214 не выполнен.

Одна из основных причин длительных сроков и высокой себестоимости освоения серийного выпуска авиационной техники – низкое качество КД, содержащей множество несоответствий [3]. Минимизация ошибок КД снижает непроизводственные затраты на корректировку изделий.

Процесс обнаружения и исправления ошибок в КД изоморфен отладке ПО. Используем модель Джелинского–Моранды (конечное начальное число дефектов) и модификацию Шика-Волвертона (учёт внесения новых ошибок при исправлении). Пусть $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ – это множество всех несоответствий (ошибок) в КД, а $E(t)$ отражает динамику изменения во времени; тип несоответствия $T(e_i) \in \{\text{"Конструктивная"}, \text{"Технологическая"}, \text{"Метрологическая"}, \text{"Логическая"}\}$; критичность ошибки $S_k \in [0, 1]$ – (0 – формальная; 0,7 – частичное влияние на функциональность; 1 – критическая); k – номер несоответствия, $F(e_k, t)$ – это статус обнаружения в период освоения производства $F(e_k, t) \in [0, 1]$ (где 0 – ошибка не исправлена; 1 – ошибка исправлена и верифицирована); t – общее время постановки на серийное производство.

$$\frac{dE_{\Pi}(t)}{dt} = -\lambda_o(t) + \lambda_H(t) + \lambda_p(t) \quad (1)$$

где $\lambda_o(t)$ – интенсивность устранения ошибок в КД, $\lambda_H(t)$ – интенсивность появления новых ошибок (при исправлении старых) в КД; $\lambda_p(t)$ – интенсивность регрессионных ошибок в КД.

Модифицированное уравнение Шика-Волвертона:

$$\frac{dE_o(t)}{dt} = \beta(t)(E_{\Pi}(t) - E_o(t)) \cdot I(t) \quad (2)$$

где $E_o(t)$ – обнаруженные несоответствия в момент времени t ; $\beta(t)$ – показатель эффективности выявления ошибок в КД, а $I(t)$ – интенсивность усилий по проверке КД, как соотношение кадрового ресурса ко времени.

Качество документации с учётом ошибок:

$$Q(d_i, t) = \sum_{j=1}^m w_j q_j(d_i, t) \cdot \prod_{k=1}^n [1 - S(e_k) \cdot (1 - F(e_k))] \quad (3)$$

где $q_j(d_i, t)$ – оценка качества конструкторского документа d_i в момент времени t при $q_j \in [0, 1]$; w_j – вес каждой оценки качества $\sum_{j=1}^m w_j \leq 1$ (таблица 3).

Время на устранение несоответствий:

$$T_P(d_i, s_j) = T_B(d_i, s_j) + T_{\text{Испр}} \quad (4)$$

где $T_B(d_i, s_j)$ – плановая продолжительность постановки на серийное производство и корректировки конструкторского документа d_i на стадии s_j (условно постановку на серийное производство можно разбить на несколько этапов (таблица 2)), для каждого этапа $j \in [1, 4]$: s_1, s_2, s_3, s_4 – коэффициенты сложности корректировки КД на каждом из этапов;

Суммарное время для исправления всех несоответствий с учетом среднего времени $T_{\text{ср}}$ на устранение 1-го несоответствия:

$$T_{\text{Испр}} = \Sigma T_{\Phi}(e_k, s_j) = T_{\text{ср}} \cdot s_j \cdot s_{jj} \cdot \sum_{k=1}^n S(e_k) \quad (5)$$

$T_{\Phi}(e_k, s_j)$ – дополнительное время исправления несоответствий e_k на j -стадии с коэффициентом сложности корректировки s_j и коэффициентом сложности в зависимости от этапа обнаружения или категории ошибки s_{jj} рассчитывается как:

$$T_{\Phi}(e_k, s_j) = S(e_k) \cdot T_{\text{ср}} \cdot s_j \cdot s_{jj} \quad (6)$$

Целевая функция оптимизации:

$$\min[\alpha \cdot T_P(d_i, s_j) - \beta(Q_{\max} - Q_{\min}) + \gamma(C_{\max} - C_{\min}) + \delta \cdot R] \quad (7)$$

где $Q_{\max}$ – максимальная сумма критичности всех несоответствий:
 $Q_{\max} = \sum_{k=1}^n S(e_k)$;

$Q_{\min}$ – сумма критичности неоткорректированных несоответствий:
 $Q_{\min} = \sum_{k=1}^n S(e_k) \cdot (1 - F(e_k))$;

$C_{\max}$ – совокупные затраты на работу с конструкторской документацией в ходе освоения серийного производства без учета стоимости корректировки и доработки;

$C_{\min}$ – стоимость корректировки и доработки изделия;

$R = \sum_{k=1}^n S(e_k) \cdot P(e_k)$ – риск от необнаруженных ошибок $S(e_k)$ вероятностью $P(e_k)$;

α – весовой коэффициент приоритета показателя времени ($\alpha = 0,2 \dots 0,5$);

β – весовой коэффициент приоритета показателя качества ($\beta = 0,2 \dots 0,5$);

γ – весовой коэффициент приоритета показателя стоимости ($\gamma = 0,1 \dots 0,3$);

δ – весовой коэффициент показателя чувствительности к рискам ($\delta = 0,1 \dots 0,3$).

Управляющие воздействия:

$$U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), v_1(t), v_2(t), \dots, v_r(t)] \quad (8)$$

где базовые (рутинные операции по контролю качества КД) воздействия $u_p(t)$: $u_1(t)$ – интенсивность контроля КД (глубина анализа и т.д.); $u_2(t)$ – приоритетность корректировки критических несоответствий (алгоритм проведения изменений, кадровое обеспечение); $u_3(t)$ – автоматизированный анализ (корректность электрических схем, актуальность НТД); специализированные воздействия (ресурсоемкий и дополнительный контроль) $v_r(t)$: $v_1(t)$ – интенсивность контроля КД (регулярность контрольных сборок и аудитов); $v_2(t)$ – кросс-функциональный контроль КД (внешний контроль КД, формализация контроля); $v_3(t)$ – контроль внесенных изменений КД (отступления от базового КД с проведением типовых и других видов испытаний).

Эффективность выявления:

$$\beta_{\Sigma}(t) = \beta_{\text{Б}}(t) \cdot (1 + \sum_{v=1}^r \beta_v(t)) \quad (9)$$

где $\beta_B(t)$ – показатель эффективности планового контроля по выявлению несоответствий (текущие корректировки КД в ходе процесса постановки на серийное производство); $\beta_v(t)$ – показатель эффективности повышенного контроля по выявлению несоответствий.

Бюджетное ограничение:

$$\sum_{i=1}^h \sum_{k=1}^n C(e_k) \cdot F(e_k) \leq C_{lim} \quad (10)$$

где i – количество конструкторских документов d_i ; $C(e_k)$ – стоимость исправлений k -го несоответствия; $F(e_k)$ – состояние несоответствия (несоответствие при 0 – не исправлена, 1 – исправлена, *может быть введена «найдена, но не исправлена» с коэффициентом 0,5?*); C_{lim} – предельная стоимость устранения всех несоответствий.

Ограничение на допустимый риск:

$$\sum_{k=1}^n S(e_k) \cdot (1 - F(e_k)) \leq R_D \quad (11)$$

где $S(e_k) = 0$ – формальная, 0,3 – низкое влияние на функциональность, 0,7 – частичное влияние на функциональность, 1 – критическая; R_D – максимально допустимый уровень риска (количество допустимых несоответствий от 0 до 5).

Вероятность необнаружения:

$$P(e_k) = e^{-\sum_{r=1}^l \Theta_r \cdot v_r(t) \cdot t} \quad (12)$$

где t – период постановки на серийное производство.

Стоимость корректировки:

$$C(e_k, t) = C_B \cdot e^{k \cdot (t - t_{обн})} \quad (13)$$

где $k > 0$ – коэффициент роста стоимости (как правило 1:10:100); $t_{обн}$ – время фактического внесения несоответствия в КД; $(t - t_{обн})$ – задержка между внесением и обнаружением несоответствия; C_B – ?

Существует метод [5] регрессионного анализа статистических данных, изложенный в [6], для определения области безразличия суммарных затрат на качество КД. Однако в предложенном варианте отсутствует классификация несоответствий по типам и их критичность для этапа освоения серийного производства. Распределив ресурсы между контролем, обнаружением и исправлением несоответствий КД, что важно при запуске "сырой" конструкторской документации в серийное производство, постановку задачи оптимального управления выполним следующим образом:

$$\{U(t), V(t)\} = \operatorname{argmin} \int_0^T [\alpha \cdot (T_P) - \beta(Q_{max} - Q_{min}) + \gamma(C_{max} - C_{min}) + \delta \cdot R(\tau)] d\tau \quad (14)$$

При условиях что:

1) Обеспечивается минимально заданный уровень качества

$$\sum_{k=1}^n S(e_k) \cdot (1 - F(e_k, t)) \leq T_D \quad (15)$$

2) Ограничивается количество доработок и устранений несоответствий:

$$Iteration(d_i, t) \leq Max_iterations(d_i) \quad (16)$$

3) Не превышает максимально допустимая вероятность не обнаружения критических несоответствий:

$$P(e_k) \leq P_{max}(e_k) \quad (17)$$

4) Количество специалистов, занятых при контроле качества и корректировке КД, не должно превышать максимально установленных типовых кадровых ресурсов штатного расписания предприятия:

$$K(t) \leq K_{max}(t) \quad (18)$$

На примере индикатора ИМ-21-2 (самолёт МС-21) с исходным количеством несоответствий 127 (критических 15, высоких 42, средних 55, низких 15) при базовой эффективности выявления $\beta_6 = 0,15$ и дополнительных мерах контроля ($v_1=0,2$; $v_2=0,15$; $v_3=0,25$) получено $\beta_9 = 0,24$. Динамика обнаружения: $E_0(t) = 127(1 - e^{-0,06 \cdot t})$. За 8 месяцев обнаружено 50 несоответствий (39 %), исправлено 42 (33 %). Дополнительное время корректировки составило 1675,2 ч, общее время $T_p = 2795,2$ ч (в 1,5 раза больше планового). Экономические потери сопоставимы с прямыми затратами. Модель показывает, что запуск «сырой» КД увеличивает сроки освоения в 2 раза и затраты на 50 %.

Предложенная модель позволяет обосновать необходимость тщательной отработки КД до серийного производства, сравнивать затраты на контроль с экономией от сокращения ошибок, прогнозировать сроки.

Критические несоответствия требуют в 60 раз больше времени на исправление, чем формальные, что требует их приоритетного анализа до начала производства установочной серии. Дальнейшее развитие – интеграция с PLM-системами, учёт квалификации специалистов и применение машинного обучения.

Список литературы

1. Балахнин Г.С. Организация и планирование конструкторских работ при освоении производства. М.: «Машиностроение», 1986. -112 с.
2. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х книгах /Н. Дрейпер, Г. Смит: перевод с английского. – Книга 1. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
3. Комиссаров, А. В. Методика управления качеством бортового оборудования изделий авиационной и наземной техники / А.В. Комиссаров, А.В. Виноградов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 18, № 4(3). 2016. С. 578-585.
4. Попов, Д. К. Перспективы и вызовы внедрения отечественных технологий в авиастроение. Тренды импортозамещения в российской авиационной промышленности / Д. К. Попов. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2024. – № 48 (547). – С. 108-109.
5. Хунов Т. Х., Медведев Д.В., Полесский С. Н. Исследование математических моделей прогнозирования надежности программного обеспечения. International Scientific – Practical Conference «INFO-2014». С. 563-568.
6. Юрин, Д. С. Организация процесса улучшения качества рабочей конструкторской документации на авиастроительном предприятии / Д. С. Юрин, А. С.

УДК 669.017

ЧИНАХОВ Д.А., МЕЩЕРИНА Н.В.

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛА И КЕРАМИКИ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

***Аннотация:** В данной статье представлены методы современных технологий для создания неразъемных соединений таких материалов как металл и керамика, а так же перспективные направления развития, способы получения данного неразъемного соединения и применения припоя.*

***Ключевые слова:** Неразъемные соединения, сварка, пайка, герметичность, материалы, сталь, керамика.*

Неразъемные соединения являются важными в современных технологиях где предъявляются требования к высокой надежности и долговечности соединяемых конструктивных элементов, позволяя разъединять его без разрушения связывающих его компонентов, делая его важным в условиях, где высокие механические нагрузки и агрессивные условия эксплуатации становятся нормой. Соединение металла и керамики представляют собой задачу в этой области, так как требует учета многих факторов, таких как различие в физико-химических свойствах, температурных расширениях и механической прочности [1].

Соединения металла и керамики используются в компонентах, где действует высокая температура и давление, что необходимо для создания надежных и герметичных соединений, что особенно важно для таких отраслей промышленности как аэрокосмическая индустрия, автомобилестроение, электроника [2].

Керамические и металлические соединения становятся все более распространенными в авиационной промышленности из-за необходимости обеспечивать легкие, но прочные конструкции, которые способны выдерживать экстремальные условия эксплуатации [3].

Получение кольцевого неразъемного соединения металл-керамика является проблематичным из-за различий в их механических свойствах и коэффициентах температурного расширения, так как при резком изменении температуры в местах соединения может происходить образование трещин и других дефектов, из-за чего снизится прочность и эксплуатационная надежность такого соединения [4].

Существующие методы соединения металла и керамики

Существует несколько технологий, которые зарекомендовали себя в области соединения металла и керамики:

Фотополимеризация в ванне

Технология фотополимеризации в ванной представляет собой использование суспензий керамических частиц для получения изделий с помощью метода фотополимеризации, при которой печать осуществляется в ванне, что позволяет добиться высокой точности при минимальных размерах заготовок [4].

Лазерная сварка

Лазерная сварка позволяет соединять такие разнородные материалы при высоких температурах и давлении, обеспечивая образование тонкого реактивного слоя, значительно улучшая прочность соединения [5].

Технология LTCC

Технология осуществляет соединение металлов с низким удельным электрическим сопротивлением, например такие как золото и серебро, при низких температурах, давая возможность избежать ненужного термического воздействия на соединяемые материалы, тем самым снижая риск возникновения трещин [6].

Толсто пленочная технология

Данный метод представляет собой формирование толстых проводящих пленок с использованием специальных паст. Данные пасты содержат примеси металлических порошков, стекол и органических веществ, обеспечивая создание прочностных соединений с высокой устойчивостью к воздействию внешней среды. Данная технология эффективна для достижения пленок толщиной в несколько десятков микрометров [7].

Процесс пайки металлизированной керамики

Пайка металлизированной керамики проводится в специальных печах в среде водорода, где применяется медный припой. Данный вид соединения отличается высокой прочностью соединений и является подходящим для производства медицинских и высокоточных компонентов [8].

Одним из направлений для методов исследования является соединение керамических материалов с танталовой подложкой. Данная технология может варьировать реакционные составы для формирования многослойных керамических соединений на танталовой подложке, которая является полезной для получения многослойных функциональных покрытий и различных функционально-градиентных материалов.

Заключение:

Неразъемные соединения металла и керамики играют ключевую роль в современных технологиях, обеспечивая необходимые свойства

прочности, герметичности и долговечности конструкций в различных отраслях, таких как автомобилестроение, аэрокосмическая индустрия и медицина. Однако соединение этих разнородных материалов представляет собой сложную задачу из-за различий в их механических свойствах и реакциях на температурные изменения.

Существующие технологии, такие как ЛТСС, толсто пленочная технология, пайка металлизированной керамики, фотополимеризация и лазерная сварка, предоставляют ряд решений для достижения прочных и надежных соединений. Тем не менее, каждая из методов имеет свои ограничения, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований и разработки новых подходов.

Перспективные направления включают использование тонких составных прослоек и материалов, таких как специальные припои, которые могут значительно улучшить адгезию и герметичность соединений металла и керамики. Устойчивость к механическим нагрузкам и температурным колебаниям, а также возможность достижения высокой прочности соединений делают такие исследования актуальными и необходимыми для расширения применения неразъемных соединений в различных областях.

Таким образом, развитие технологий неразъемных соединений продолжает оставаться актуальным направлением для повышения эффективности и надежности соединений металла и керамики, что в свою очередь будет способствовать более широкому внедрению таких решений в современные промышленные процессы.

Список литературы

1. Мещанинова Т.И., Конакова И.П., Белоусова В.А., Истомина Э.Э., Жигалова Е.Я, Соединения разъемные и неразъемные // учебное издание, Екатеринбург 2008, 81 с.
2. Кондратюк Р. Металлизация поверхности низкотемпературной керамики под сварку // Промышленные технологии 2012, 2, 32.
3. А.М. Балясный, Ю.Н. Гордиенко, Ю.К. Грузевич, Н.М. Недосека, В.М. Шулаев Активная пайка вакуумноплотных металлов керамических корпусов фотоэлектронных приборов. // Прикладная физика 2018, 6, 104.
4. А.В. Бутузов, А.В. Семина Предкерамические полимеры для производства керамических изделий путем полимеризации в ванне. Способы получения и свойства // Композиционные материалы 3, 145, 2025. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88
5. Хомич Ю.В. Исследование термической обработки поверхностей металлов и керамик наносекундными импульсами лазерного ультрафиолетового излучения для диффузионной сварки специальность 2.6.1 (05.16.01) Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хомич Юрий Владиславович; Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. - Санкт-Петербург, 2021. - 139 с.
6. А.Бабаев, Савченко Н., Козлов В., Семенов А., Григорьев М. Работоспособность композиционной керамики Y-TZP-Al₂O₃ при сухом высокоскоростном тчении термически упрочнённой стали марки 40X//учебное

издание. Обработка материалов (технология, оборудование, инструменты) 2, 27, 2025. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-159-173.

7. А.А.Зенин, А.С.Климов Электронно-лучевая пайка алюмооксидной керамики с металлом с применением форвакуумного плазменного источника электронной//Электроника, измерительная техника, радиоэлектроника и связь//Доклады ТУСУРа 1, 27, 2013.

8. О.К. Камынина, С.Г. Вадченко, А.С. Щукин Соединение керамических материалов с танталовой подложкой в условиях самораспределяющегося высокотемпературного синтеза// Самораспространяющийся высокотемпературный синтез// Известия Вузов 3, 2018. DOI/10.17073/1997-308X-2018-3-41-45

УДК 004.832.2

НАСИБУЛИНА И.А., КИСЕЛЕВ С.К.

Ульяновский технический университет, г. Ульяновск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИИ ПРОМПТОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

***Аннотация.** В статье рассматривается перспективное направление автоматизации оформления конструкторской документации (КД) в авиастроении с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) и промптов. Анализируются ключевые проблемы, связанные с рутинными операциями и «человеческим фактором» при ручном заполнении чертежей, спецификаций и технических требований. Предлагается концепция ИИ-ассистента, интегрированного в CAD-системы, который на основе детализированных текстовых запросов (промптов) способен генерировать и заполнять стандартные элементы КД (основные надписи, пункты технических требований, наименования в спецификациях) в соответствии с нормами ЕСКД и отраслевыми стандартами. На практических примерах демонстрируется эффективность подхода, позволяющего значительно сократить временные затраты на оформление документации, минимизировать количество ошибок и высвободить инженерный ресурс для решения более сложных проектных задач.*

***Ключевые слова:** искусственный интеллект, ИИ, промпт-инжиниринг, автоматизация, конструкторская документация, КД, цифровизация, авиастроение, САПР, CAD, ЕСКД, управление данными об изделии.*

Введение

В условиях современного авиастроения, где сложность изделий достигает тысяч деталей, а требования к срокам и качеству очень высоки, ручное оформление конструкторской документации (КД) становится узким местом. Цифровизация производства требует не просто перехода на CAD-

системы, а глубокой автоматизации рутинных операций. Одним из самых перспективных направлений сегодня является применение искусственного интеллекта (ИИ), управляемого через промпты, для оформления и генерации КД.

Промпт – это специальный запрос или инструкция, подаваемые в модель искусственного интеллекта для запуска выполнения определенной задачи.

Типичный пример промта – инструкция, задаваемая языку программирования или модели ИИ для генерации текста, создания изображения или выполнения вычисления.

Существует несколько классификаций промтов, отражающих разные стороны их предназначения и характера использования:

1. По форме подачи команды:

- Простой текстовый промт: Простое предложение или фраза, задающее задание (пример «Опиши пейзаж»).

- Формализованный промт: специально сформированная команда с параметрами и условиями (пример «Создать рисунок моря ночью с указанием цвета фона и освещения»).

- Комплексный промт: составная конструкция, включающая уточняющие детали и цели (пример «Предложи меню здорового завтрака для веганов, учитывая калорийность и вкусовые предпочтения клиента»).

2. По виду выполняемой задачи:

- Генеративные промты: используются для генерации новых данных, таких как тексты, изображения, звуки.

- Инференционные промты: запросы, направленные на интерпретацию или обработку существующего материала.

- Комбинированные промты: включающие оба типа запросов.

3. По степени детализации:

- Минималистичные промты: очень короткие запросы, дающие лишь общее представление о требуемом результате.

- Среднего размера промты: более точные и полные формулировки, содержащие четкие критерии.

- Максимально детализованные промты: полностью прописанные задачи с описанием контекста, условий и желаемого конечного результата.

В настоящее время промты широко используются в следующих областях:

- Генерация контента (текстов, изображений, музыки)
- Автоматизация задач (анализ данных, принятие решений)
- Образование и обучение (формулировка заданий, составление учебных планов)

- Медицина и диагностика (описание симптомов заболеваний, подготовка отчетов)
- Игры и развлечения (создание сюжетов, персонажей, игровых миров)

Особенность промтов состоит в том, что они обеспечивают прямую связь между человеческим пониманием задачи и моделью ИИ, позволяя человеку взаимодействовать с технологиями искусственного интеллекта.

Проблема оформления КД

Рутинные операции и «человеческий фактор»

Оформление комплекта КД на авиационный узел (например, кронштейн, панель или элемент шасси) включает в себя:

- Создание и заполнение основной надписи (штампа) по ЕСКД [1].
- Генерацию спецификаций и ведомостей.
- Оформление технических требований.
- Проверку соответствия обозначений.

Эти задачи отнимают до 30–40% времени инженера-конструктора. Кроме того, высокая монотонность работы неизбежно ведёт к ошибкам: опечатки в обозначениях, пропущенные пункты в тектребованиях, несоответствие форматов. В авиастроении цена такой ошибки может быть критической. Критериями эффективности, для разрабатываемого программного обеспечения будут: результативность, оперативность и устойчивость [2].

Предлагаемое решение - ИИ-ассистент на базе промтов

Современные большие языковые модели (LLM) способны понимать контекст технического задания и генерировать структурированный текст. Ключевым инструментом взаимодействия с таким ассистентом является промт – детально сформулированный запрос-инструкция.

Вместо ручного заполнения текстов, инженер использует промты для делегирования задач ИИ.

Пример 1: Автоматическое заполнение основной надписи (штампа)

Ручной процесс: Инженер открывает шаблон, вручную вписывает код изделия, литеру, массу, количество листов.

Процесс с ИИ: Инженер выделяет 3D-модель или сборку в CAD-системе и использует промт:

«Сгенерируй данные для основной надписи по ГОСТ 2.104-2006. Код изделия: [А-123-500], Наименование: Кронштейн крепления гидронасоса, Литера: О1...»

Результат: ИИ мгновенно формирует готовый блок текста для штампа.

Пример 2: Генерация технических требований (ТТ)

Ручной процесс: Поиск нужных формулировок в актуальных стандартах (ОСТ, ГОСТ).

Процесс с ИИ: Инженер анализирует 3D-модель детали (например, наличие резьбовых отверстий) и использует промпт:

«Сгенерируй пункт технических требований для детали из алюминиевого сплава Д16Т с резьбовыми отверстиями М6...»

Результат: ИИ выдаёт готовый, технически грамотный пункт для технических требований.

Пример 3: Создание описаний для спецификаций

Ручной процесс: Формулировка наименования стандартных изделий.

Процесс с ИИ: Промпт:

«Сформулируй наименование для ведомости покупных изделий: Болт с шестигранной головкой...»

Результат: ИИ выдаёт стандартизированную строку для спецификации.

Интеграция в производственный цикл

Использование промптов интегрируется в CAD-систему:

- Анализ геометрии: Система определяет материал, массу.
- Генерация промпта: Создаётся скрытый запрос на основе анализа.
- Вызов ИИ: Модель отправляет запрос к нейросети.
- Вставка результата: Текст автоматически заполняет поля в чертеже.

Таким образом, промпт-инжиниринг и системное администрирование при работе с генеративными нейросетями имеют немалые перспективы роста, что важно и для науки [3].

Заключение

Внедрение искусственного интеллекта, управляемого промптами, позволяет сократить время на оформление КД в 3–5 раз, минимизировать ошибки и освободить инженеров для решения творческих задач. Для авиастроения это означает ускорение вывода новых изделий на рынок и повышение качества подготовки производства.

Список литературы

1. ГОСТ 2.001–2013. Единая система конструкторской документации. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2014.
2. Муравин А.Н. Критерии эффективности и надежности систем автоматизированного проектирования // Транспортное дело России. 2012. № 6. – С. 46 – 47
3. Соколова М. Е. ChatGPT и промпт-инжиниринг: о перспективах внедрения генеративных нейросетей в науку // CyberLeninka.

УДК 621.316.24

СТРУЧКОВСКИЙ Е. В., КИСЕЛЕВ С. К.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНОЙ АВИОНИКИ ПРИ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВЕ И РАЗРАБОТКЕ

Аннотация. В статье рассматривается создание универсального диагностического модуля для испытаний авиационных приборов на производстве. Модуль на базе микросхемы Zynq (FPGA + ARM) автоматически распознаёт тип подключённого устройства (аналоговое, цифровое, дискретное). Аналоговые сигналы оцифровываются, после чего все сигналы анализируются параллельно. Модуль использует простые алгоритмы-предвестники для прогнозирования отказов, расчёта надёжности и выдачи рекомендаций.

Ключевые слова: диагностика авионики, Zynq, FPGA, алгоритмы-предвестники, прогнозирование отказов, оцифровка сигналов, надёжность.

Введение

Авиационные приборы становятся всё сложнее. Они используют разные сигналы: аналоговые (напряжение, ток), цифровые (RS-232, ARINC 429) и дискретные (включено/выключено). При испытаниях на заводе каждый тип прибора требует своей настройки стенда. Для быстрой проверки и автоматизации требуется универсальный диагностический модуль, который сам понимает, какой прибор подключен, и проверяет его без дополнительной перенастройки. Модуль должен предсказывать отказы и оценивать надёжность, не используя сложный искусственный интеллект (это важно для сертификации).

Основная проблема разработки

Современное производство авиационных приборов и индикаторов характеризуется широкой номенклатурой изделий, использующих различные физические интерфейсы для обмена информацией [1]. На одном испытательном участке могут одновременно проверяться аналоговые датчики давления (выходной аналоговый сигнал 0...10 В), цифровые блоки навигации с протоколом ARINC 429, многофункциональные индикаторы с дискретными командами управления, а также устройства смешанного типа, сочетающие несколько видов сигналов.

Традиционные испытательные стенды, как правило, проектируются под конкретный тип интерфейса. Для проверки аналогового прибора используется один стенд, для цифрового – другой, для дискретного –

третий. При смене номенклатуры изделий оператор вынужден физически перенастраивать оборудование: переключать кабели, менять измерительные модули, вручную задавать параметры протокола в программном обеспечении. Это занимает от нескольких часов до рабочей смены, повышает риск ошибок коммутации и снижает пропускную способность испытательной линии.

На сегодняшний день не существует устройств, способных автоматически идентифицировать типы сигналов, обрабатывать их параллельно и на основе простых правил выявлять признаки грядущих отказов. Разработка и исследование такого модуля являются актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит значительно повысить эффективность испытаний авионики на этапах производства и разработки [2].

Для решения этой проблемы, необходимо:

1. Научить модуль распознавать тип сигнала – аналоговый, цифровой или дискретный.
2. Преобразовать аналоговые сигналы в цифровой вид (оцифровать), цифровые и дискретные сигналы оставить как есть. Zynq работает с цифровыми сигналами
3. Разработать алгоритмы-предвестники – правила, которые замечают, что прибор начинает работать хуже (например, растёт шум или меняется форма сигнала).
4. Разработать и реализовать модель определения и прогнозирования надежности (например, сколько времени ещё проработает прибор).
5. Разработать систему рекомендаций (ремонтировать, заменить и др.) на основе результатов работы алгоритмов-предвестников.

Модуль предлагается реализовать на микросхеме Zynq, содержащей две части: FPGA (быстрая логика для обработки сигналов) и ARM (процессор для расчётов) [3]. Сигналы подключаются к входам модуля.

Распознавание типа сигнала

Программируемая логическая матрица (FPGA) формирует короткие тестовые воздействия малой амплитуды и анализирует полное сопротивление на входной линии. Высокоомное состояние интерпретируется как признак аналогового входа. Наличие подтягивающих резисторов к питанию или земле свидетельствует о цифровой природе сигнала. После первичной классификации FPGA выполняет поиск стартовых последовательностей стандартных протоколов (ARINC 429, RS-232). При обнаружении корректного протокола его тип сохраняется в конфигурации. Если ни один протокол не идентифицирован, модуль проверяет наличие кратковременных импульсов, характерных для дискретных команд. Аналоговые сигналы дополнительно распознаются по диапазону напряжения. Все операции должны выполняться автоматически, без участия оператора.

Алгоритмы-предвестники

В модуле работают простые математические правила для каждого сигнала отдельно [4]. Примеры:

1) Дрейф нуля – для аналогового сигнала. Модуль запоминает значение, когда сигнал должен быть ноль. Если оно уходит больше, чем на 0,5 %, выдаётся предупреждение.

2) Рост шума – для аналогового сигнала. Измеряется разброс значений в типовом режиме. Если шум стал больше порога – возможно, скоро отказ.

3) Изменение фронтов – для цифрового сигнала. Модуль измеряет, как быстро сигнал переключается с 0 на 1. Если фронт стал пологим – проблема в драйвере.

4) Ошибки в данных – для цифрового протокола. Подсчитывается сколько раз пришла некорректная контрольная сумма. Если часто – предвестник отказа.

5) Пропущенные команды – для дискретного. Если команда не пришла вовремя, модуль это фиксирует.

Все пороги заданы заранее для каждого типа прибора. Модуль подстраивается под конкретный экземпляр.

Расчёт надёжности

Модуль ведёт журнал: сколько времени проработал прибор, сколько было предвестников (особенно опасных). По формуле вычисляет:

- Интенсивность отказов λ = (число опасных предвестников) / (время работы);

- Прогноз остаточного ресурса $T = 1 / \lambda$;

- Вероятность безотказной работы за ближайшие 100 часов = $e^{(-\lambda \cdot 100)}$.

Рекомендации

Для каждого предвестника есть таблица, предлагающая меры по устранению выявленной ситуации [5]. Например:

1) Дрейф нуля – Старение усилителя – Заменить микросхему, провести калибровку.

2) Рост шума – Высыхание конденсаторов – Проверить ESR, заменить.

3) Пологий фронт – Ослабление пайки – Перепаять контакты

Заключение

Предлагается разработка универсального диагностического модуля на базе Zynq. Модуль предназначен для определения типа сигналов (аналоговые, цифровые, дискретные). Аналоговые сигналы должны быть оцифрованы, все сигналы анализируются параллельно по отдельным

правилам-предвестникам. Результатом работы модуля является прогноз возникновения отказов, оценка остаточного ресурса и выдача рекомендаций по исправлению ситуации. Основная цель разработки модуля – повышение производительности операции контроля и тестирования авиационных приборов и повышение их надежности.

Список литературы

1. Модели и алгоритмы выбора аппаратно-программного комплекса распределённых систем обработки информации и управления [Электронный ресурс]: автореферат диссертации Бежитский С. С. Красноярск, 2006 г.
2. Модели и алгоритмы выбора эффективной конфигурации многопроцессорных систем обработки информации и управления [Электронный ресурс]: автореферат диссертации Панфилов И. А. Красноярск, 2006 г.
3. Xilinx Zynq-7000 SoC Technical Reference Manual [Электронный ресурс]: техническое руководство. – Xilinx, 2018 г.
4. Огунвоул Б. И., Будаев В. Д., Сизиков Д. О. К анализу методов и механизмов прогностического моделирования надежности бортового оборудования при решении задач планирования объемов работ по техническому обслуживанию воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА [Электронный ресурс]: научная статья. – 2025 г.
5. Уманский Д. М. Разработка методов и алгоритмов диагностики устройств многофункциональной индикации с использованием предикативной аналитики [Электронный ресурс]: научная статья // КиберЛенинка. – 2025 г.

УДК 658.562:004.9

СКОРНЯКОВ Р. Ю.

АО «Силовые машины»

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

***Аннотация.** В статье проведен анализ подходов к управлению качеством конструкторской документации в системах автоматизированного проектирования. Рассмотрены традиционные методы и современные концепции. Выполнено сравнение периодического и непрерывного управления качеством. Показано, что существующие подходы не в полной мере учитывают специфику КД как информационного продукта. Обоснована целесообразность разработки единых методик управления качеством КД и их интеграции в САПР.*

***Ключевые слова:** управление качеством, конструкторская документация, САПР, непрерывный мониторинг, статистический контроль.*

Современные вызовы и амбициозные задачи по развитию приборостроительной отрасли требуют от предприятий наращивания объемов выпуска и расширения ассортимента российской электронной

продукции [1]. Для решения поставленных задач, отраслевым производителям необходимо непрерывно обеспечивать повышение производительности труда и соответствие выпускаемой продукции ожиданиям потребителей через улучшение качества продукции [2]. Качество конструкторской документации (КД) является определяющим фактором успешного выпуска приборов и изделий в любых отраслях промышленности [3, 4]. Ошибки в КД приводят к браку, доработкам и дополнительным затратам. Совокупность задач, вызовов и рисков обуславливает для предприятий необходимость внедрения новых подходов и создание обоснованных методик повышения качества КД.

Методики, применяемые для контроля качества КД основываются на требованиях и рекомендациях Единой системы конструкторской документации и сопутствующих Государственных стандартах, которые предписывают согласование и утверждение документов, а также дают рекомендации по учету и передаче в подразделение-разработчик информации о выявленных несоответствиях. Согласование КД происходит в порядке, отраженном в основной надписи документа по ГОСТ 2.104 [5], в том числе согласование на технологичность по ГОСТ 14.201 [6] и нормоконтроль по ГОСТ 2.111 [7]. Однако, указанные стандарты устанавливают требования к процессу согласования, но не предъявляют единых жестких требований по учету и дальнейшей работе с выявленными ошибками. В связи с этим, предприятия-изготовители и разработчики изделий самостоятельно определяют порядок работы по повышению качества КД. Настоящая статья посвящена анализу существующих подходов и выявлению перспективных направлений для управления качеством КД с интеграцией в системы автоматизированного проектирования.

Наиболее распространенным подходом к управлению качеством КД на предприятиях является статистический контроль качества. Статистические методы управления качеством были разработаны У. Шухартом в 1920–1930-х годах и получили широкое распространение в промышленности после Второй мировой войны [8]. При таком подходе, в рамках процесса управления качеством, используются такие инструменты как контрольные карты Шухарта, для отслеживания интересующих показателей за период – для КД это количество ошибок, диаграмма Парето, применяется для выделения наиболее значимых факторов - для КД это разработчики с наибольшим количеством ошибок за период, а также распределение ошибок по типам и сложности документа. Не смотря на широкое распространение данного подхода, он имеет ряд недостатков, к которым относятся необходимость формализации данных о несоответствиях (ошибках), при низком количестве несоответствий, подход не сработает ввиду недостаточности информации для анализа, подход не дает информации о причинах, требуется дополнительная работа

по их установлению. В связи с этим, статистические методы контроля часто применяются совместно с требованиями стандартов серии ИСО 9000, в которых определены основные требования к системам менеджмента качества и проведению корректирующих действий. Основой для управления качеством, в этом случае, является процессный подход, построенный на принципах постоянного улучшения по циклу Деминга – PDCA. В процессе управления качеством КД, этапы цикла Деминга, в общем случае, выглядят следующим образом:

1. Постановка цели по показателям качества КД, разработка мероприятий по достижению целей.
2. Внедрение разработанных мероприятий.
3. Анализ показателей качества после внедрения мероприятий, сравнение с целевыми значениями.
4. Стандартизировать и, при необходимости, тиражировать внедренные мероприятия. Скорректировать или отменить мероприятия, не приведшие к положительному результату.

Представленный подход является системным, прозрачным, практически применимым и направленным, однако имеет недостатки, к которым относится отсутствие алгоритмов для автоматизации в САПР и, зачастую, формальное выполнение со стороны исполнителей.

Помимо традиционных подходов к управлению качеством КД с повсеместным внедрением систем автоматизированного проектирования, предприятия тестируют и частично переходят на современные методы управления качеством с интеграцией последних в САПР. Так, синергия концепции всеобщего управления качеством и непрерывного мониторинга качества КД в реальном времени представляет собой системный подход к управлению качеством, направленный на сокращение цикла разработки КД и повышения качества проектирования. К основным принципам такого подхода относится ориентация на потребителя при разработке документации, персональная ответственность разработчика или группы разработчиков за качество выпускаемой КД, регулярный анализ ошибок и принятие решений, направленных на устранение первопричин их возникновения. Непрерывный мониторинг и интеграция в САПР, в этом случае позволяют ускорить получение обратной связи от проверяющего, привязать выявленные ошибки непосредственно к документу в системе, визуализировать текущее состояние системы с возможностью гибкой настройки отчетов и мониторов качества. К недостаткам современных подходов можно отнести отсутствие единого математического описания процесса оценки эффективности мероприятий и единого алгоритма реализации методик управления качеством КД на уровне САПР.

Проведенный анализ показал, что современные подходы обладают преимуществами перед традиционными, однако имеют узкие места, обуславливающие необходимость проведения дальнейших исследований, а

именно разработке единых методик управления качеством и их развития с интеграцией в системы автоматизированного проектирования.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 №20-р «О Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. и плане мероприятий по ее реализации» от 17.01.2020 №20-р
2. Приложение 2 к Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. «Меры по управлению рисками реализации Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года
3. Норенков И.П. Основы САПР. – М.: МГТУ, 2019.
4. Петров В.А. Информационно-управляющие системы. – СПб.: ЛЭТИ, 2021.
5. ГОСТ 2.104-2023 Единая система конструкторской документации. Основные надписи. – М.: Российский институт стандартизации, 2024.
6. ГОСТ 14.201-83 Обеспечение технологичности конструкции изделий Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2009.
7. ГОСТ 2.111-2013. Единая система конструкторской документации. Нормоконтроль. – М.: Стандартинформ, 2014.
8. Адлер Ю.П., Шпер В.Л. Управление качеством. – М.: Стандарты и качество, 2019.

УДК 629.7.018:519.876.5

КОМИССАРОВ А.В., ТАМЬЯРОВА М.В.

АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», г. Ульяновск, Россия

ОЦЕНКА МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ КВАРЦЕВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КУБЕ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ

***Аннотация.** В статье рассмотрена проблема оптимизации метода испытаний акселерометра в условиях серийного производства, при котором разворот относительно вектора силы тяжести осуществляется с помощью высокоточного металлического куба с перпендикулярными гранями, а не классическим разворотом с применением оптических делительных головок или специальных поворотных стендов. Произведена оценка возможностей и ограничений при использовании данного подхода. Приведено описание методики измерений и необходимой предварительной подготовки. Предложена процедура приведения полученных значений крутизны и смещения нулевого сигнала в нормальных климатических условиях к единой температурной точке 30 °С.*

***Ключевые слова:** компенсационный акселерометр, измерения, нулевой сигнал, крутизна, измерение ускорения.*

Компенсационный акселерометр [1] – это устройство, которое с высокой точностью измеряет кажущееся ускорение подвижного объекта. Основными метрологическими характеристиками являются такие параметры как: нулевой сигнал, крутизна, погрешность базы, разрешающая способность, чувствительность, линейность и др. Однако при серийном производстве, есть возможность постоянно контролировать лишь часть самых важных и паспортизируемых параметров – нулевой сигнал, крутизну зависящие от температуры внешней среды с определением их нестабильности. Для получения указанных параметров необходимо ориентировать ось чувствительности акселерометра относительно вектора ускорения свободного падения и производить съём выходного сигнала.

На рис. 1 представлена механическая схема измерений, классическим способом для ориентирования оси чувствительности акселерометра в поле силы тяжести является использование оптической делительной головки (3) (далее по тексту ОДГ), установленной на горизонтирующую плиту (2). Плита в свою очередь установлена на разделённом виброизолированном фундаменте (1). Температурные воздействия на акселерометр (4) оказываются термокамерой (5).

С целью оптимизации испытательного цикла и снижения трудоемкости в условиях серийного выпуска акселерометров актуальной задачей становится использование экспресс-методов, позволяющих проводить предварительную оценку и отбор приборов с минимальными издержками без использования дефицитного дорогостоящего оборудования типа ОДГ.

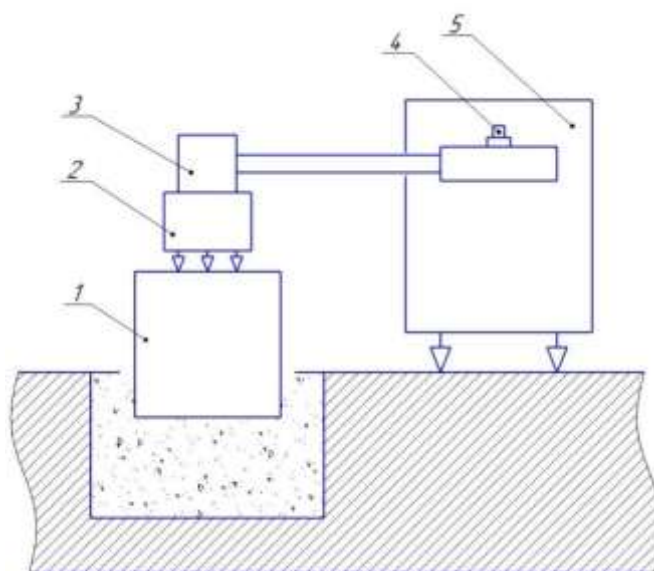


Рисунок 1 – Механическая схема измерений.

Методика эксперимента

Для проведения исследований был изготовлен куб (рисунок 3) из материала Д16Т размером 50х50х50 мм, базовая поверхность (основание куба) имеет плоскостность, не превышающую 0,03 мм, а параллельность противоположной грани и установочной поверхности под акселерометр не превышает 0,03 мм.

На рисунке 2 представлена схема для расчёта угла отклонения α поверхности на которой установлен акселерометр относительно базовой (основания).

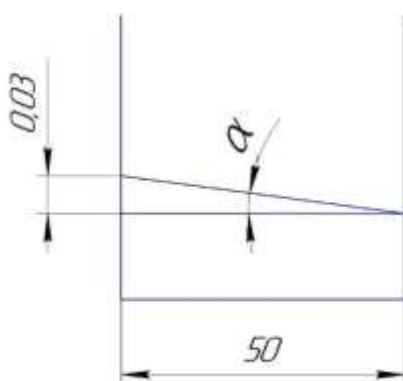


Рисунок 2 – Расчётная схема угла отклонения поверхности

$$\alpha = \arctg \frac{0,03}{50} \approx 2'$$

Шероховатость установочной поверхности под акселерометр доведена до $\sqrt{Ra} 0,8$.

Указанные требования к кубу позволяют получить величину несовпадения измерительной оси акселерометра с вектором ускорения свободного падения не превышающую 2 угловых минут. Произведём оценку погрешности в измерении ускорения свободного падения:

$$g_{\text{измер.}} = g_{\text{ист.}} \cdot \cos(2') = 0,9999998308g$$

$$\Delta g = \frac{g_{\text{ист.}} - g_{\text{измер.}}}{g_{\text{ист.}}} \cdot 100\% = 0,000017\%$$

где $g_{\text{измер.}}$ – измеренное значение ускорения свободного падения, $g_{\text{ист.}}$ – истинное значение ускорения свободного падения, Δg – погрешность в измерении ускорения свободного падения.

Величина погрешности составила менее 0,00002%, что в 1000 раз меньше по сравнению с требованиями к стабильности крутизны компенсационных акселерометров среднего класса точности $\Delta U_k = 0,02\%$ [2]. С учётом формулы (1) расчёта нулевого сигнала можно принять, что погрешность измерения нулевого сигнала не превышает $10^{-8}g$.

$$g_t = \frac{U_{+1g} + U_{-1g}}{2 \cdot U_k} \quad (1)$$

где U_{+1g} – выходной сигнал акселерометра в положении $+1g$ (180°), U_{-1g} – выходной сигнал акселерометра в положении $-1g$ (0°), U_k – крутизна акселерометра, g_t – нулевой сигнал.



Рисунок 3 – Акселерометр, установленный в кубе

С учётом проведенной предварительной оценки возможной погрешности, можно утверждать, что точности механической обработки куба достаточно для проведения измерений.

Эксперимент проводился в следующей последовательности:

1) плоскую гранитную плиту выставляли на виброизолированный фундамент в плоскость горизонта по пузырьковому прецизионному уровню, погрешность которого не превышает 5 угловых секунд;

2) на плиту устанавливался куб с вмонтированным в него акселерометром, затем на изделие подавалось питание и выдерживалось в таком состоянии 60 минут;

3) по истечении 60 минут проводилось измерение выходного сигнала акселерометра в положениях, соответствующих $\pm g$ с усреднением в течение 30 с;

4) проводился пересчёт полученных значений крутизны и нулевого сигнала к стандартизированной точке $+30^\circ\text{C}$ по формулам (2), (3), (4), (5), (6) с учётом полученных температурных зависимостей этих параметров ранее.

$$\Delta t = \frac{U_{\text{ТД}}^{30} - U_{\text{ТД}}^{\text{текущ.}}}{K_{\text{ТД}}}, ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\xi U_k^{30 \dots \text{текущ.}} = \frac{U_k^{30} - U_k^{\text{текущ.}}}{\Delta t \cdot U_k^{30}}, 1/^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\xi g_t^{30 \dots \text{текущ.}} = \frac{g_t^{30} - g_t^{\text{текущ.}}}{\Delta t}, g/^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$U_{\text{красч.}}^{30} = \frac{U_k^{\text{текущ.}}}{(1 - \xi U_k^{30 \dots \text{текущ.}} \cdot \Delta t)}, \text{B/g} \quad (5)$$

$$g_{tрасч.}^{30} = g_t^{текущ.} + \xi g_t^{30...текущ.} \cdot \Delta t, ^\circ\text{C} \quad (6)$$

где Δt – фактическая разница температур, $U_{тд}^{30}$ – выходное напряжение термодатчика при 30°C , $U_{тд}^{текущ.}$ – выходное напряжение термодатчика при текущей температуре окружающей среды, $K_{тд}$ – коэффициент крутизны термодатчика, $\xi U_k^{30...текущ.}$ – температурный коэффициент крутизны акселерометра, U_k^{30} – крутизна выходного сигнала акселерометра при 30°C , $U_k^{текущ.}$ – крутизна выходного сигнала акселерометра при текущей температуре окружающей среды, $\xi g_t^{30...текущ.}$ – температурный коэффициент нулевого сигнала акселерометра, g_t^{30} – значение нулевого сигнала при 30°C , $g_t^{текущ.}$ – значение нулевого сигнала при температуре окружающей среды, $U_{kрасч.}^{30}$ – приведённая расчётная величина абсолютного значения крутизны акселерометра, $g_{tрасч.}^{30}$ – приведённая расчётная величина абсолютного значения нулевого сигнала акселерометра.

Следует отметить, что в лабораторных условиях температура постоянно изменяется (но никогда не превышает 30°C) и соответственно изменяется выходной сигнал акселерометра вместе с расчётными значениями крутизны и нулевого сигнала, однако встроенный в акселерометр термодатчик позволяет произвести пересчёт требуемых величин относительно любой температуры окружающей среды при условии постоянства температурных коэффициентов крутизны и нулевого сигнала, а также коэффициента крутизны термодатчика [3].

Основные преимущества предложенного метода можно оценить при рассмотрении сравнительной таблицы 1.

Недостатки и ограничения метода:

1. невозможность использования метода без предварительного получения температурных коэффициентов крутизны и нулевого сигнала акселерометра, а также коэффициента крутизны термодатчика;
2. Невозможность оценки погрешности «базы» акселерометра, ввиду наличия синусоидальной зависимости выходного сигнала в положениях 90° и 270° .

Заключение

Оценка возможности использования металлического куба с плоскопараллельными гранями для получения основных метрологических характеристик компенсационных акселерометров по результатам проведенных исследований дала положительный результат. Метод позволяет в 1,5 раза сократить продолжительность проведения контрольных операций и существенно снизить общую трудоемкость технологического цикла проведения испытаний.

Таблица 1. Основные преимущества предложенного метода

Критерий	Новый метод	Старый метод
Стоимость	Очень низкая (< 30 тыс. р)	Высокая (> 1 млн. р)
Адаптивность	Легко воспроизводится при отсутствии дорогостоящего оборудования	Невозможен, без приобретения ОДГ
Сложность	Низкие требования к испытателям, отсутствует необходимость постоянной поверки и ремонта	Средние требования к испытателям, необходимость периодической поверки и ремонта
Необходимость постоянного монтажа изделий	Отсутствует, так как изделие ставится в термокамеру вместе с кубом, что позволяет сократить трудоёмкость в 1,5 раза	Постоянно необходимо монтировать и демонтировать изделие, что ведёт к увеличению трудоёмкости и возможности повреждения изделия
Дополнительно использование нового метода позволяет высвободить мощность испытательного участка, для проведения испытаний наиболее точных акселерометров		

Несмотря на ограниченную точность, обусловленную погрешностями позиционирования, метод является высокоэффективным инструментом для экспресс-оценки и предварительного отбора продукции. Внедрение в производственный процесс позволяет использовать высокоточное метрологическое оборудование либо для получения температурных коэффициентов крутизны и нулевого сигнала акселерометра для последующих расчётов, либо для финальной поверки паспортизируемых значений или для испытаний акселерометров наивысшего класса точности, оптимизируя производственные потоки.

Список литературы

1. Коновалов С.Ф. Теория виброустойчивости акселерометров // Машиностроение 1991. С. 11-12.
2. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В. Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока// Системотехника: Системные проблемы надежности, качества и информационных технологий. 2012. №10.
3. С.В. Каразеев, А.В. Комиссаров, С.К. Киселев, О.О. Пивоваров Исследование влияния положения кварцевого маятникового акселерометра АК-15 в пространстве на показания термодатчика // Автоматизация в промышленности. 2019. №10.

УДК 621.385.69

ТЕРЕХИН В.В., ГАРАНОВИЧ Д.И., ОГУРЦОВА К.М.

ООО «ИнноЦентр ВАО», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ООО «СВЧ КИТ»

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ «СВЧ КИТ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В АВИАЦИОННЫХ УНИВЕРСИТЕТАХ

***Аннотация:** Статья посвящена проблеме подготовки инженерных кадров для авиастроительной отрасли, связанной с переходом на отечественную электронную компонентную базу (ЭКБ). В качестве решения проблемы рассмотрена система быстрого прототипирования «СВЧ КИТ». Приведены примеры сборки радиотрактов на отечественной ЭКБ. Сделан вывод о целесообразности внедрения «СВЧ КИТ» в учебные лаборатории авиационных вузов.*

***Ключевые слова:** СВЧ КИТ, быстрое прототипирование, СВЧ-тракты, отечественная ЭКБ, подготовка инженерных кадров*

Введение

Импортозамещение в радиоэлектронной отрасли Российской Федерации, в том числе в сфере разработки и производства авиационных радиотехнических систем, требует системной подготовки инженерных кадров, владеющих компетенциями в области проектирования устройств на отечественной ЭКБ [1]. Необходимость в таких специалистах становится критически важной для предприятий авиастроительного комплекса, где надёжность и эффективность бортового радиоэлектронного оборудования напрямую связаны с качеством инженерных решений.

Одной из проблем, замедляющей практическую подготовку инженеров, остаётся длительный цикл экспериментальной отладки, традиционно требующий разработки индивидуальных печатных плат для каждого тракта [1]. В условиях учебных лабораторных работ, где студенты работают над ограниченными по времени проектами, такой подход неприемлем. Для авиационной промышленности, где необходима разработка трактов до 20 ГГц, особенно остро востребованы подходы, которые ускоряют обучение без потери глубины инженерной подготовки.

В данной работе проведен обзор отечественной платформы быстрого прототипирования «СВЧ КИТ» [4] в качестве основы для практико-ориентированной подготовки инженеров-разработчиков бортовой радиоэлектронной аппаратуры для авиастроительных предприятий.

1. Описание платформы «СВЧ КИТ»

СВЧ КИТ представляет собой систему прототипирования СВЧ-радиотрактов, позволяющую соединять СВЧ-блоки между собой без пайки. Она состоит из алюминиевого основания, на которое монтируются СВЧ-блоки и разъёмы, соединяемые стандартными переходами (рисунок 1). На обратную сторону основания устанавливаются платы питания и управления, коммутируемые через боковую плату. Номенклатура насчитывает более 100 СВЧ-блоков, охватывающих диапазон частот от единиц МГц до 25 ГГц: усилители, аттенюаторы, фазовращатели, смесители, синтезаторы, детекторы мощности, фильтры и коммутаторы.

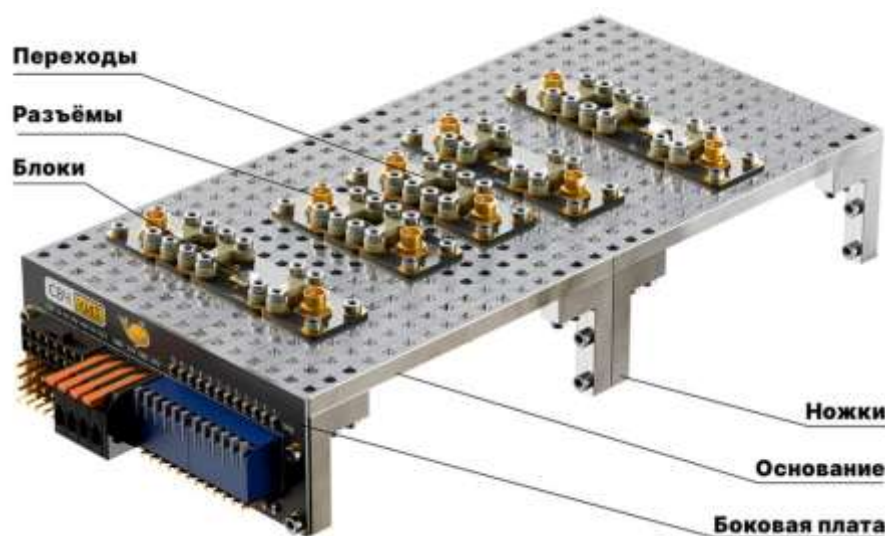


Рисунок 1 – Общий вид платформы «СВЧ КИТ»

2. Возможности использования в учебном процессе

СВЧ КИТ позволяет студентам быстро собирать работающие радиотракты без разработки индивидуальных печатных плат. На начальном этапе обучения студенты знакомятся с типовыми узлами: усилителями, смесителями, аттенюаторами и т.д. Они собирают их по готовым инструкциям и проводят измерения. В отличие от готовых учебных стендов по радиотехнике, СВЧ КИТ позволяет разрабатывать радиотракты с нуля, а затем испытывать их. Поэтому опыт, получаемый студентами, максимально приближен к опыту, получаемому при разработке радиотрактов на предприятиях.

На старших курсах студенты могут интегрировать в тракт настраиваемые компоненты, например цифровые аттенюаторы, фазовращатели, и исследовать их влияние на параметры системы. Это напрямую моделирует задачи проектирования бортовых радиолокационных станций, систем связи и навигации авиационных комплексов, где требуется перенастройка рабочих частот и режимов.

Кроме того, благодаря открытости стандартов платформы, студенты могут разрабатывать собственные блоки и интегрировать их в систему наравне с готовыми СВЧ-блоками. Это позволяет выполнять курсовые проекты и выпускные квалификационные работы, максимально приближенные к реальным техническим заданиям авиастроительных предприятий.

3. Примеры использования в учебном процессе

Эффективность подхода подтверждается проектами, выполненными с использованием «СВЧ КИТ». Например, был собран и протестирован измерительный тракт на базе отечественного GaN-усилителя мощности iPA-72-MB, работающего в диапазоне 1–6 ГГц и обеспечивающего выходную мощность 3 Вт, а также системы управления питанием iPWR (рисунок 2). Измерения подтвердили паспортные данные: на частоте 2 ГГц выходная мощность составила 3,2 Вт, время нарастания импульса питания – 22 нс, время спада – 18 нс.



Рисунок 2 – Фото измерительного тракта iPA-72-MB с системой управления питанием iPWR

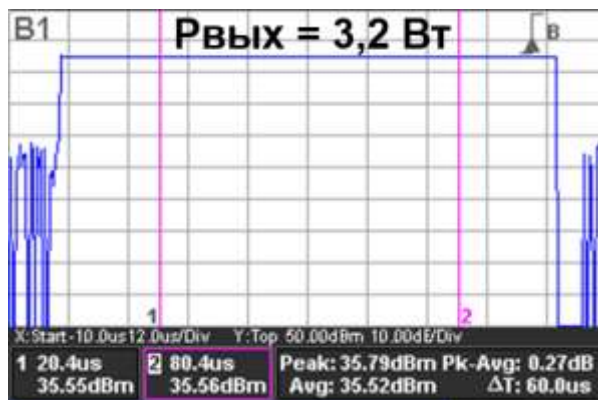


Рисунок 3 – Огибающая радиоимпульса

Также на платформе был собран макет радиочастотного интерфейса L-диапазона на основе отечественных квадратурных модулятора и демодулятора серии K1324, синтезатора iFSY-304-M36 и кварцевого генератора ГК258-П. Макет успешно интегрирован с ПКР-платформой HackRF One и средой GNU Radio. Была продемонстрирована сквозная передача сигнала с модуляцией QPSK. Это готовый пример лабораторной работы по программно-конфигурируемым радиосистемам.

4. Преимущества для авиационных ВУЗов

Применение системы быстрого прототипирования «СВЧ КИТ» в авиационных университетах даёт ряд существенных преимуществ.

Во-первых, это полное импортозамещение. Вся компонентная база и конструктивные элементы платформы являются отечественными, что полностью соответствует государственной политике в области радиоэлектроники и позволяет готовить специалистов на российском оборудовании.

Во-вторых, значительное сокращение времени экспериментальной отладки. Традиционный цикл разработки индивидуальной печатной платы занимает от нескольких дней до нескольких недель. Использование «СВЧ КИТ» позволяет собрать и протестировать радиотракт в течение одного-двух академических часов, что делает платформу идеально приспособленной для учебного процесса.

В-третьих, модульность и многократное переиспользование компонентов. Благодаря унифицированному конструктиву и стандартизированным соединительным переходам, один комплект платформы может быть использован для проведения десятков различных лабораторных работ по курсам схемотехники СВЧ-устройств, радиоприёмных и радиопередающих устройств, антенно-фидерных трактов и других дисциплин.

В-четвёртых, открытость стандартов платформы. Требования к разработке печатных плат и конструктивной совместимости доступны в открытых источниках. Это позволяет студентам старших курсов в рамках курсового и дипломного проектирования разрабатывать собственные оригинальные блоки, которые затем могут быть интегрированы в существующие измерительные стенды наравне с промышленными модулями.

В-пятых, обеспечивается профессиональная готовность выпускников к работе на российских предприятиях. Освоение платформы «СВЧ КИТ» в ходе обучения предполагает непосредственную работу с отечественной электронной компонентной базой: усилителями, смесителями, аттенуаторами и другими элементами отечественного производства. Благодаря этому студенты заранее знакомятся с реальной номенклатурой отечественной ЭКБ, её характеристиками, особенностями применения и

типовыми схемами включения. К моменту выпуска они уже имеют практический опыт проектирования, сборки и настройки СВЧ-трактов на российских компонентах, что позволяет им сразу приступать к выполнению рабочих задач без дополнительного переучивания. Платформа активно используется на предприятиях радиоэлектронной отрасли, в частности в ООО «ИПК «Электрон-Маш» и АО «НИИМА «Прогресс», поэтому владение данным инструментом делает молодого специалиста востребованным и готовым к эффективной работе с первого дня трудоустройства.

Таким образом, внедрение «СВЧ КИТ» в учебные лаборатории позволяет не только повысить качество практической подготовки, но и обеспечить преемственность между университетским образованием и реальными задачами авиационной промышленности.

Заключение

Система быстрого прототипирования «СВЧ КИТ» является эффективным инструментом для повышения качества подготовки студентов в авиационных университетах. Она позволяет в короткие сроки освоить практическую работу с отечественной ЭКБ СВЧ, реализовать полный цикл проектирования радиотрактов и сформировать компетенции, востребованные на авиастроительных предприятиях. Внедрение этой платформы в учебные лаборатории будет способствовать ускорению технологического суверенитета РФ в области авионики и сокращению времени адаптации выпускников на реальном производстве.

Корректность модульного подхода подтверждена экспериментально: собран и протестирован радиотракт на базе СВЧ-усилителя iPA-72-MB и системы управления питанием iPWR. Результаты измерений (выходная мощность 3,2 Вт на частоте 2 ГГц, время нарастания импульса 22 нс, спада – 18 нс) соответствуют паспортным данным усилителя.

Список литературы

1. Гаранович Д., Григорьев О. Быстрое прототипирование СВЧ-трактов на отечественной ЭКБ с помощью системы «СВЧ КИТ» // СВЧ-электроника. – 2025. – №4. – С. 52–54
2. Основные подходы к построению схем управления питанием GaN СВЧ-усилителей мощности / Е. Савченко, А. Мартынов, А. Першин, М. Селиванов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2024. – № 9(240). – С. 96-102.
3. ЭКБ систем питания GaN СВЧ-усилителей мощности / Е. Савченко, А. Мартынов, А. Першин, М. Селиванов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2025. – № 4(245). – С. 44-48.
4. «СВЧ КИТ» : Официальный сайт. – Москва. – URL: <https://svch-kit.ru/> (дата обращения: 08.04.2026).
5. Разработка печатных плат «СВЧ КИТ» : База знаний «СВЧ КИТ». – Москва. – URL: <https://wiki.svch-kit.ru/xwiki/bin/view/Rukovodstva/Razrabotka-pechatnykh-plat-SVCH-KIT/> (дата обращения: 08.04.2026).

БОРТОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЯГИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПОЛЕТЕ

Аннотация. В статье представлена система контроля фактической тяги турбореактивного двигателя в полете с учетом факторов интеграции двигателя и планера, условий эксплуатации. Результат достигается за счет расчета фактической тяги двигателя на борту самолета в полете и сравнении ее значений с эталонными. Представлен дополненный кадр многофункционального индикатора, показывающий летчику отклонение тяги каждого двигателя от эталонной.

Ключевые слов: турбореактивный двигатель, тяга двигателя, система контроля.

Введение

Из практики летных испытаний известно, что тяга двигателей (P , кгс) одного типа может отличаться. Эти отличия вызваны индивидуальными особенностями каждого двигателя и износом элементов двигателей в процессе эксплуатации [1]. Потери тяги при этом могут достигать более 5% на некоторых режимах полета самолета и режимах работы двигателя.

На рисунке 1 показано изменение профилей полета при потерях тяги.

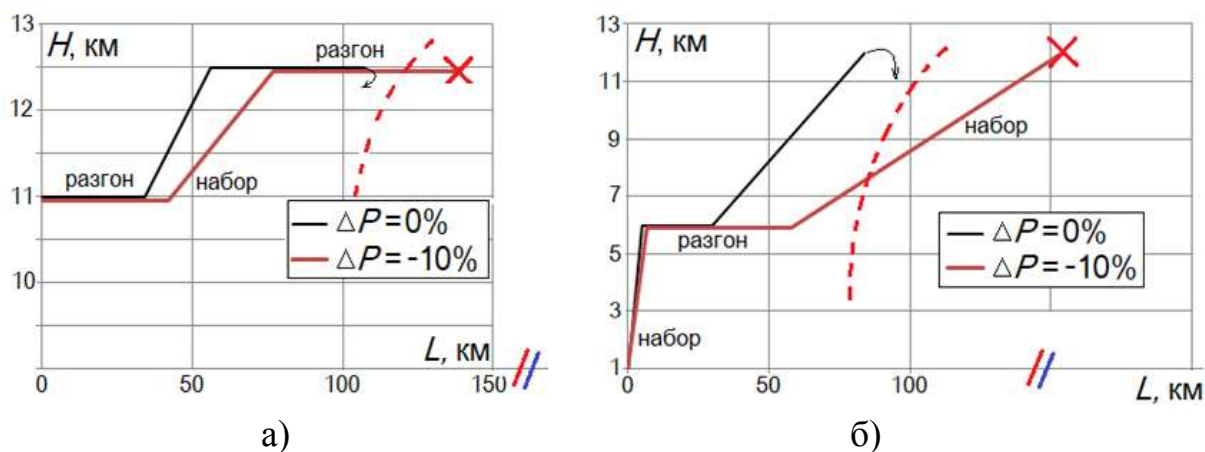


Рисунок 1 – Профили полета самолета при:

а) разгоне до максимальной скорости;

б) наборе высоты за минимум времени

На современных самолетах имеется информационно-управляющая система (ИУС), решающая в режиме реального времени в полете

топливно-временные и навигационные задачи. Для решения этих задач используется математическая модель (ММ) летно-технических характеристик (ЛТХ) самолета, которая, в свою очередь содержит тягово-расходные характеристики двигателя. Эти исходные данные не корректируются в процессе эксплуатации самолета, они едины для всех самолетов одного типа. При этом ИУС выводит летчику информацию о возможностях самолета.

В эксплуатации и при боевом применении самолетов известны случаи, когда двигатель был поврежден, происходило снижение тяги, а у летчика отсутствовала информация об отказах. Отказ двигателя, является в 51,5% случаев причиной авиационных происшествий (АП), а для самолетов 4 поколения и 4+ 28,9% [2].

Анализ имеющихся решений

Известно несколько подходов к определению тяги двигателя:

- на высотном стенде (термобарокамере) [3];
- измерением давления в сопле [4];
- математическим моделированием [5];
- раздельной идентификацией тяги и сопротивления [6].

Однако все эти подходы имеют недостатки, не позволяющие их использовать в процессе полета [7].

Поэтому при эксплуатации самолетов используются следующие способы определения снижения тяги двигателя:

1. На транспортных самолетах с турбореактивными двигателями используется значение оборотов двигателя. Если значение оборотов не соответствует программным, то летчику индицируется сигнал о нештатной работе двигателя.

2. На самолетах с турбовинтовыми двигателями летчику индицируется факт отказа двигателя только после того, как автоматика выключит двигатель и произойдет флюгирование винта.

3. На современных многофункциональных маневренных самолетах определение снижения тяги двигателя происходит посредством анализа первой и второй производной по моменту рысканья в совокупности со значениями рулевых поверхностей, решается система дифференциальных уравнений.

Таким образом, в настоящее время отсутствует бортовая система, позволяющая в режиме реального времени с высоким быстродействием напрямую определять отклонение тяги от эталонных с выдачей летчику соответствующей информации.

Постановка задачи

Возникает необходимость коррекции исходных данных, используемых в ММ ЛТХ самолета в ИУС при выполнении полета, а

именно необходимо вычислить фактическую тягу каждого двигателя. Т.е. требуется разработать бортовую систему контроля тяги турбореактивного двигателя в полете.

Определение тяги турбореактивного двигателя в полете

Изменение тяги двигателя приводит к изменению безиндуктивного коэффициента избытка тяги C_{R0} , тогда:

$$\Delta C_p = \Delta C_{R0} = C_{R01} - C_{R02};$$

$$C_{R0} = n_{xa} C_y + C_{xi} + \Delta C_p^T + C_p (1 - \sqrt{(\cos(\alpha + \varphi))^2 + (\cos(\beta))^2}) - C_{x\Sigma}^{\gamma, \beta};$$

где: n_{xa} – продольная перегрузка, ед;

C_y – коэффициент подъемной силы;

C_{xi} – коэффициент индуктивного сопротивления;

C_p – коэффициент тяги;

ΔC_p^T – поправка к коэффициенту тяги двигателя по температуре;

α – угол атаки, град;

φ – угол установки двигателя относительно строительной оси самолета, град;

β – угол скольжения, град;

γ – угол крена, град;

$C_{x\Sigma}^{\gamma, \beta}$ – коэффициент сопротивления, вызванный отклонением управляющих поверхностей самолета для парирования крена и скольжения, вызванных несимметрией по тяге;

C_{R01} и C_{R02} – безиндуктивный коэффициент избытка тяги на режимах работы двигателей №1 и №2 соответственно.

Таким образом, выполняя режимы полета разгон и торможение, на различных режимах работы двигателя, определяя значения тяги во всем диапазоне высот и скоростей полета, возможно производить коррекцию эталонной ММ ЛТХ самолета индивидуально для каждого борта, учитывая факторы интеграции и эксплуатации, влияющие на тягу [8-10].

Бортовая система контроля тяги турбореактивного двигателя

Если отклонение тяги от эталонной превышает допустимое значение, или самолет летит с креном и/или скольжением, то необходимо определить отклонение тяги каждого двигателя в отдельности, через систему, которая для двухдвигательного самолета будет выглядеть:

$$\begin{vmatrix} C_y^\alpha & 0 & C_y^\varphi & 0 & 0 \\ 0 & C_z^\beta & 0 & 0 & C_z^{\delta_H} \\ 0 & m_x^\beta & 0 & m_x^{\delta_\beta} & m_x^{\delta_H} \\ 0 & m_y^\beta & 0 & 0 & m_y^{\delta_H} \\ m_z^\alpha & 0 & m_z^\varphi & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \alpha \\ \varphi \\ \beta \\ \delta_\beta \\ \delta_H \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C_{py \text{ лв}} & C_{py \text{ пр}} \\ C_{px \text{ лв}} & C_{px \text{ пр}} \\ C_{pz \text{ лв}} & C_{pz \text{ пр}} \\ m_{xCp \text{ лв}} & m_{xCp \text{ пр}} \\ m_{yCp \text{ лв}} & m_{yCp \text{ пр}} \\ m_{zCp \text{ лв}} & m_{zCp \text{ пр}} \end{vmatrix} \Rightarrow C_{pf \text{ лв}}, C_{pf \text{ пр}}.$$

где: C_y^α – коэффициент подъемной силы крыла (планера);

C_y^φ – коэффициент подъемной силы горизонтального оперения;

C_z^β – коэффициент боковой силы по углу скольжения;

$C_z^{\delta_H}$ – коэффициент боковой силы, вызванный отклонением руля направления;

$m_x^\beta, m_x^{\delta_\beta}, m_x^{\delta_H}$ – коэффициенты моментов относительно оси X, вызванные: углом скольжения, отклонением элеронов, отклонением руля направления;

$m_y^\beta, m_y^{\delta_H}$ – коэффициенты моментов относительно оси Y, вызванные: углом скольжения, отклонением руля направления;

m_z^α, m_z^φ – коэффициенты моментов относительно оси Z, вызванные: подъемной силой, горизонтальным оперением;

m_z^φ – коэффициент момента относительно оси Z, вызванный горизонтальным оперением;

δ_β – угол отклонения элеронов, град;

δ_β – угол отклонения элеронов, град;

φ – угол отклонения стабилизатора, град;

C_{py}, C_{px}, C_{pz} – составляющие коэффициента тяги двигателя (лв – левого, пр – правого) относительно осей X, Y, Z;

$m_{xCp}, m_{yCp}, m_{zCp}$ – коэффициенты моментов тяги (лв – левого, пр – правого) двигателей относительно осей X, Y, Z;

C_{pf} – коэффициент тяги двигателя (лв – левого, пр – правого) фактический.

Затем вычисляются отклонения тяги каждого двигателя от эталонных, с выводом информации летчику (рис. 2).

.

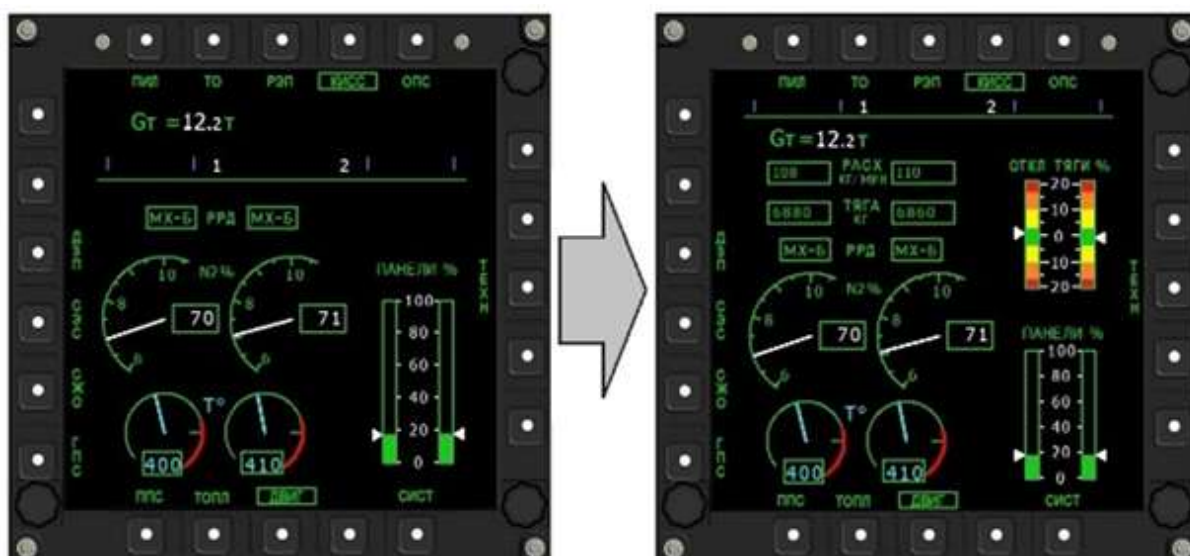


Рисунок 2 – Многофункциональный индикатор самолета с элементами, показывающими летчику отклонение тяги каждого двигателя

Выводы

Представлена бортовая система контроля тяги турбореактивного двигателя в полете, основанная на методике определения тяги турбореактивного двигателя в полете, позволяющая в режиме реального времени (в случае не выявленных отказов) рассчитывать отклонение тяги от эталонной с выдачей информации летчику.

Список литературы

1. Эзрохи Ю.А. Применение методов математического моделирования для определения в полете степени ухудшения характеристик узлов газотурбинного двигателя / Ю.А.Эзрохи, С.М.Каленский // Труды МАИ. М.: 2022. № 123. DOI: 10.34759/trd-2022-123-23.
2. Жмеренецкий В.Ф. Активное обеспечение безопасности полета летательного аппарата: методология, модели, алгоритмы / Жмеренецкий В.Ф., Полулях К.Д., Акбашев О.Ф. - Москва: Ленанд, 2014. 310 с.
3. Разработка методики пересчета результатов измерения тяги ТРДД большой двухконтурности на высотном стенде в полетные условия / С.П.Андреев, В.Е.Макаров, Я.В.Орлова [и др.] // Материалы ХХІХ научно-технической конференции по аэродинамике, 01–02 марта 2018 года / ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского. 2018. С. 35.
4. Патент № 2100788 С1 Российская Федерация, МПК G01M 15/14, G01L 5/13, G01M 15/00. Способ измерения скоростного напора газового потока и устройство для измерения тяги реактивного двигателя: № 96112850/28: заявл. 28.06.1996: опубл. 27.12.1997 / В.Г.Подколзин, И.М.Полунин, Е.Г.Буканов; заявитель АО "НИАТ".
5. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1988. 349 с.
6. Корсун О.Н. Обоснование подходов к раздельной идентификации эффективной тяги двигателей и силы аэродинамического сопротивления по данным летных испытаний / О.Н.Корсун, Б.К.Поплавский // XII всероссийское совещание по

проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 года М.: Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, 2014. С. 3371-3377.

7. Николаев С.В., Тупицын А.П., Меренцов Д.С. Способ контроля состояния (тяги) турбореактивного двигателя в полёте на фиксированных режимах работы. Вестник ВГТУ. 2024. Т. 20, № 4. С. 33-42.

8. Николаев С.В., Тупицын А.П. Методика идентификации тягово-расходных характеристик двигателя летательного аппарата. Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 5. С. 36-45.

9. Николаев С.В., Тупицын А.П. Методика идентификации температурных поправок к тяге двигателя летательного аппарата в летных испытаниях. Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77, № 12. С. 560-566.

10. Николаев С.В., Тупицын А.П. Способ контроля состояния турбореактивного двигателя самолета в полёте. Моделирование авиационных систем: Сборник тезисов докладов V Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 29-30 ноября 2023 года. Москва: ГосНИИАС. 2023. С. 384-385.

СЕКЦИЯ 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.391.825

ДИНЬ Н.Т., ГАЗИЗОВ Т.Р.

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники, г. Томск, Россия

МАКСИМИЗАЦИЯ РАЗНОСТИ ПОГОННЫХ ЗАДЕРЖЕК МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПРОВОДНИКАМИ В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

***Аннотация.** Вычислены зависимости разности погонных задержек ($\Delta\tau$) от параметров поперечного сечения модального фильтра с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке. Оптимизация толщины подложки, ширины сигнальных проводников и выбора материала подложки увеличила $\Delta\tau$ с 1,23 до 3,82 нс/м. Это позволяет защиту от импульсов в 3 раза большей длительности.*

***Ключевые слова:** Авионика, электромагнитная совместимость, модальный фильтр, сверхкороткие импульсы, связанные полосковые линии.*

Современные тенденции развития авионики направлены на повышение их функциональных возможностей при одновременном уменьшении габаритов с ростом плотности монтажа. Это приводит к усложнению электромагнитной обстановки внутри неё и повышает актуальность обеспечения электромагнитной совместимости [1]. Отдельной проблемой стала защита авионики от преднамеренных электромагнитных помех [2]. Это стало особенно актуальным с развитием средств функционального поражения беспилотных летательных аппаратов [3], что требует их комплексной защиты [4].

Одним из опасных электромагнитных воздействий являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [5]. Благодаря малой длительности и широкому спектру СКИ могут проникать в различные цепи аппаратуры, вызывая искажения сигналов, нарушения передачи данных и повреждения функциональных узлов [6]. Для защиты РЭА от СКИ могут использоваться модальные фильтры (МФ) [7], действие которых основано на модальном разложении сигнала в многопроводной структуре. Из-за различия погонных задержек мод, исходный импульс, воздействующий на входе защищаемого устройства, раскладывается на импульсы меньшей амплитуды.

Недавно запатентовано новое устройство защиты от СКИ в виде МФ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке [8], пока

очень мало исследованное. В работе [9] моделировалось влияние ряда геометрических параметров поперечного сечения на помехозащитные характеристики этого МФ. Между тем это сделано не в полном объёме, хотя возможности моделирования позволяют сделать это эффективнее эксперимента. Поэтому целью работы является более детальное моделирование влияния параметров поперечного сечения МФ на разность погонных задержек его мод ($\Delta\tau$) для её максимизации, повышающей длительность СКИ, разлагающегося в МФ полностью.

Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC [10] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. На рис. 1, *а* представлено поперечное сечение МФ, где w – ширина сигнальных проводников, а w_1 – опорных, s – расстояние между сигнальными проводниками, d – расстояние между сигнальными и опорными проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки, а ϵ_r – её относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Исходные параметры [9]: $w=1$ мм, $w_1=6$ мм, $s=0,2$ мм, $d=10$ мм, $h=0,5$ мм, $t=18$ мкм, $\epsilon_r=4,5$. На рис. 1, *б* приведена принципиальная схема МФ в виде связанной линии (длиной $l=1$ м) с сопротивлениями ($R1-R4$), равными среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. Воздействовал трапецевидный импульс с электродвижущей силой (ЭДС) 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс.

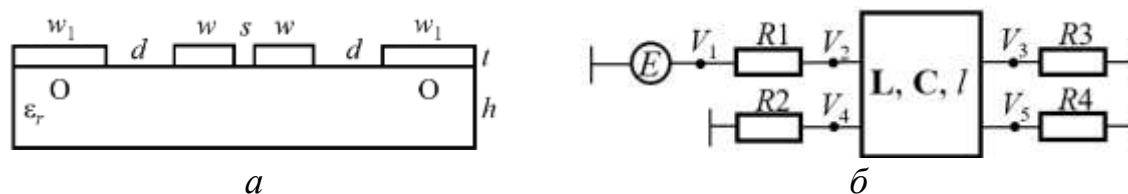


Рисунок 1 – Поперечное сечение (*а*) и принципиальная схема (*б*) МФ

В [9] установлено, что оптимизация $\Delta\tau$ возможна при w и h в пределах от 0,2 до 0,7 мм. Вместе с тем, для более полной картины, этот диапазон расширен: взята h от 0,1 до 1,5 мм с шагом 0,1 мм) при $w=0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$ мм. Зависимости $\Delta\tau$ от h при разных w приведены на рис. 2. Видно, что максимум $\Delta\tau$ смещается влево с уменьшением w , а наибольший (1,33 нс/м) достигается при $h=0,31$ мм и $w=0,2$ мм.

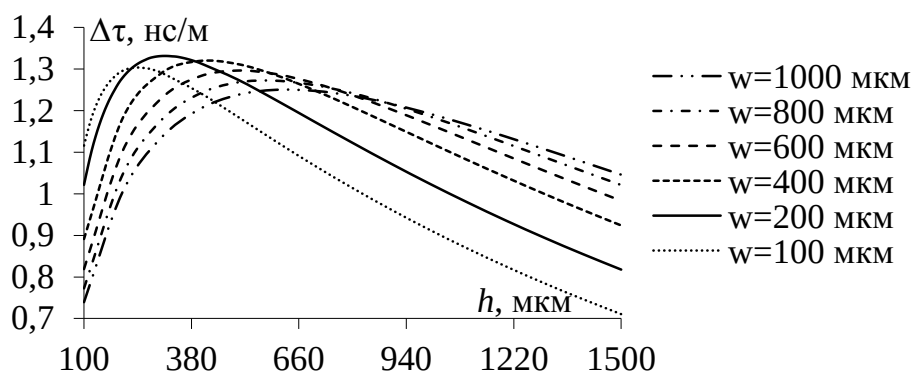


Рисунок 2 – Зависимости $\Delta\tau$ от h при разных w

Далее исследованы зависимости τ_1 , τ_2 и $\Delta\tau$ от w_1 и d при изменении w_1 от 1 до 10 мм, а d – от 5 до 15 мм. Полученные результаты представлены на рис. 3. Также приведены значения τ_1 и τ_2 , соответствующие моментам прихода нечётной и чётной мод в точку V_3 .

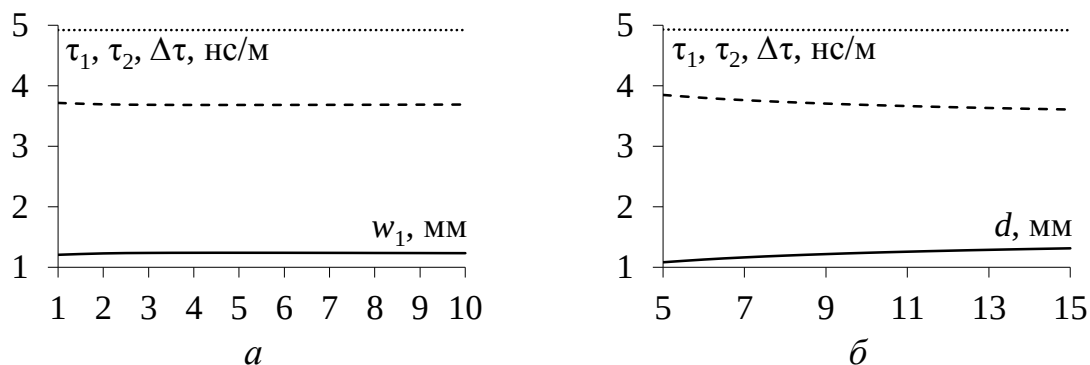


Рисунок 3 – Зависимости τ_1 (---), τ_2 (...) и $\Delta\tau$ (—) от w_1 (a) при $d=10$ мм и от d (б) при $w_1=6$ мм

Из рис. 3a видно, что w_1 почти не влияет на $\Delta\tau$. Из рис. 3б следует, что с ростом d , τ_2 почти не меняется, а τ_1 слабо снижается, что даёт малый рост $\Delta\tau$. Следовательно, ростом d можно повышать $\Delta\tau$, хотя это может быть нецелесообразным с точки зрения конструкции устройства.

Для оценки влияния диэлектрика на $\Delta\tau$ взяты $\epsilon_r=4,5$; 9,8; 16 (FR-4, поликор и ФЛАН). Результаты при $w=0,2$ мм (найденный выше оптимум) представлены на рис. 4. Виден рост $\Delta\tau$ с ростом ϵ_r . Экстремумы $\Delta\tau=1,33$; 2,66; 3,82 нс/м при $\epsilon_r=4,5$; 9,8; 16 соответственно. Все они для $h\approx 0,31$ мм.

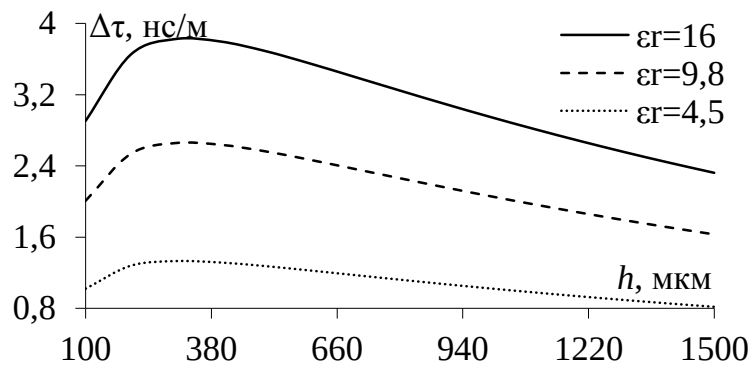


Рисунок 4 – Зависимости $\Delta\tau$ от h при разных ϵ_r

На рис. 5 представлены показательные формы напряжения в узлах V_1 , V_2 , V_3 при исходных и оптимальных параметрах: $h=0,31$ мм и $w=0,2$ мм, $\epsilon_r=16$. Видно, что исходный импульс раскладывается на 2 импульса с меньшей амплитудой, а $\Delta\tau=1,23; 3,82$ нс/м.

Таким образом, проведен анализ зависимости $\Delta\tau$ от параметров поперечного сечения МФ с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке и выявлена возможность максимизации $\Delta\tau$. Чем больше ϵ_r , тем выше $\Delta\tau$: вплоть до 3,82 нс/м при $\epsilon_r=16$ и оптимальных h и w .

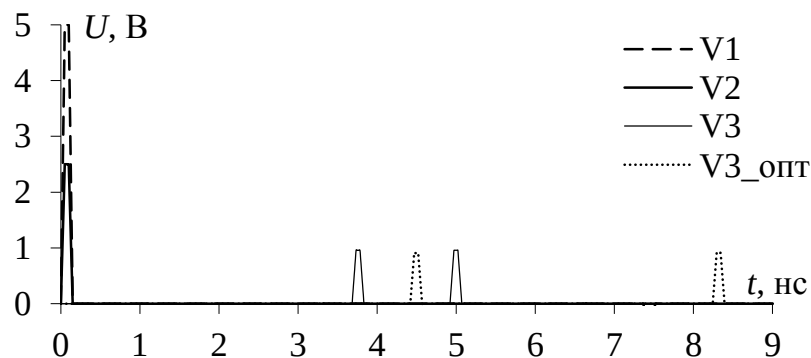


Рисунок 5 – Формы ЭДС (V_1) и напряжения в начале (V_2) и конце МФ до (V_3) и после ($V_3_{\text{опт}}$) оптимизации

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по проекту FEWM-2024-0005.

Список литературы

1. Li E.P., Wei X.C., Cangellaris A.C., Liu E.X., Zhang Y.J., D'Amore M., Kim J., Sudo T. Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2010. Vol. 52, no. 2. P. 248–265.
2. Газизов Т.Р. Преднамеренные электромагнитные помехи и авионика // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 2. – С. 37–51.

3. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – №3. – С. 122–157.

4. Белоусов А.О. Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход / А.О. Белоусов, А.В. Носов // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 10–47.

5. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 2014. № 41. 92 p.

6. Tsyanenka D., Mordachev V., Sinkevich E., Galenko A., Ma X., Guo W.-Q. UWB EMP Susceptibility Testing of General-Purpose Electronic, Radio Communication, and Industrial Equipment // Proceedings of the 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC). – Nusa Dua-Bali, Indonesia: IEEE, 2021. – P. 41–44.

7. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата : моногр. / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

8. Пат. 2 850 908 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке / Е.Б. Черникова (РФ), Т.Р. Газизов (РФ). – № 2 025 118 096; заявл. 01.07.25; опубл. 17.11.2025, Бюл. № 32. – 5 с.

9. Динь Н.Т. Анализ характеристик устройства защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке // XXXI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР - 2026», Томск, Россия. – 2026. – В печати.

10. Система TUSUR.EMC – Программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emc.tusur.ru/>, свободный (дата обращения: 15.04.2026).

УДК 641.45.026.8

ЗУБКО А.И.

ОКБ им.А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ ГТД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

***Аннотация.** В статье анализируется необходимость поэтапного комплексного подхода к формированию базы знаний или матрицы мод характеризующей текущее техническое состояние роторной системы и позволяющей анализировать тенденции его изменения. Его использование дает возможность построить тренд изменения диагностических параметров для составления прогноза периода исправного функционирования газотурбинного двигателя.*

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, диагностика, роторная система

Авиационные газотурбинные двигатели – относятся к классу машин и механизмов с повышенными требованиями к надежности и обеспечению исправного состояния в сложных условиях эксплуатации и на протяжении значительного времени и ресурса.

Большое внимание при этом уделяется качеству работы роторных систем и подшипников их опор. Для этого проводится большое количество расчетно-экспериментальных работ при разработке и изготовлении данных деталей и узлов, что обеспечивает заданные показатели надежности, но не может исключить возможность влияния на роторную систему экстремальных внешних и внутренних факторов. Для минимизации их воздействия требуется развитая система диагностики, позволяющая контролировать текущее техническое состояние основных узлов и прогнозировать сохранение их работоспособности в долгосрочной перспективе. При этом, чем раньше будут определены начальные стадии критических изменений конструкции, тем меньше затрат будет необходимо для их локализации и устранения возможных последствий.

В настоящих реалиях наибольшую эффективность имеет вибродиагностика. Путем постоянного мониторинга вибрационных параметров можно выявлять до 80-90 % развивающихся неисправностей роторных систем. Постоянное развитие методов диагностирования предполагает дальнейшее увеличение этого показателя.

Основные сложности процесса вибродиагностирования связаны:

- со значительным удалением датчиков вибрации от их источников;
- большим количеством виброактивных элементов двигателя и самолета (включающие в себя коробки приводов агрегатов, приводные агрегаты, аэродинамические колебания, внешние и внутренние возмущения и т.д.);
- необходимость выделения, а возможно и усиления вибрационных сигналов от интересующих объектов, имеющих значительно ниже уровень амплитуды в сравнении с другими источниками;
- не всегда однозначным соответствием причин изменения вибрационного состояния с их внешним проявлением.

Например, при развитии питтинга беговой дорожки подшипника опоры ротора ГТД, вызывающего увеличение рабочего зазора до 0,1 мм и более происходит увеличение дисбаланса ротора, точка приложения суммарного вектора которого, как правило, значительно не совпадает с сечением расположения подшипника.

Аналогичным образом проявляется, появляющееся в процессе длительной эксплуатации, влияние ослабления затяжки резьбовых соединений стяжных элементов ротора. Следствием чего является

изменение относительного геометрического положения отдельных элементов ротора, вызывающие изменение величины и расположение точки приложения суммарного вектора дисбаланса, в зависимости от частоты вращения ротора и других внешних факторов (поля температур ротора, величины растягивающих усилий от аэродинамических сил и т.д.).

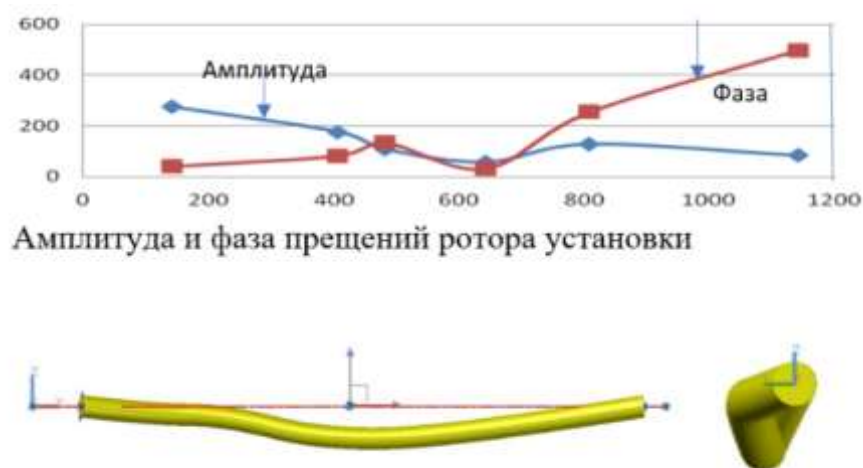


Рисунок 1 – Форма прогиба ротора

На рисунке 1 представлены результаты измерения пространственного покложения ротора ГТД установленными вдоль его наружной поверхности проксиметрами. Испытания проводились в вакуумном разгонно-балансировочном стенде. Аэродинамические нагрузки отсутствовали. Поле температур равномерное – в соответствии с условиями окружающей среды. Максимальное смещение геометрического центра ротора составило 0,4 миллиметра, при частоте вращения ротора около 8000 оборотов в минуту. При увеличении и уменьшении частоты вращения ротора не только величина прогиба, но его форма постоянно изменялись и принимали различные значения. Это объясняется изменением жесткости в различных сечениях ротора из-за частичного изменения площади полного контакта между прилегающими поверхностями отдельных элементов ротора при увеличении значений действующих на него сил.

Реакцией на переменную по величине и направлению точку приложения дисбаланса в окружности опоры, является изменение параметра вектора вибрации.

Для учета этих факторов, при проведении диагностирования можно формализованно представить роторную систему в виде модели. Внешнее воздействие на систему и функция преобразования в системе (передаточные функции между элементами роторной системы) – неизвестны. Для решения задач диагностирования доступно только выходное воздействие – ее вибрация.

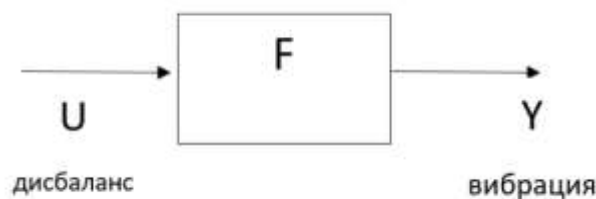


Рисунок 2 – Условное представление системы

Математическая модель:

$U = (u_1, u_2 \dots u_n)$ – множество входов;

$Y = (y_1, y_2 \dots y_n)$ – множество выходов;

F – функция преобразования множества U во множество Y ;

Для диагностирования роторных систем и ГТД в целом, довольно часто используются диагностические модели, которыми называются совокупность математических выражений, связывающих параметры объекта диагностирования, управляющие (возмущающие) воздействия, наблюдаемые величины и дефекты.

Они могут быть: линейные и нелинейные, сигнальные, с использованием параметров наблюдателей состояния, с помощью избыточных переменных и т.д.

Особенности математической модели роторной системы:

- по характеру протекающих процессов **динамическая** – значения выходов $Y(t)$ зависят от всего прошлого входного процесса $U(T)$.

$$Y(t) = F\{U(T), T \leq t\};$$

- по характеру описания параметров во временной области – **непрерывная**;

- по характеру описания параметров в частотной области – **нестационарная** математическая модель с параметрической частотной характеристикой:

$$W(j\omega, t) = W(p) \Big|_{p=j\omega};$$

где: $W(p)$ – передаточная функция;

p – оператор дифференцирования;

j – мнимая единица;

ω – круговая частота.

- по виду взаимосвязи входных и выходных параметров **нелинейная**:

$$\frac{dY(t)}{dt} = \dot{Y}(t) = F\{Y(t), U(t), t\} \text{ непрерывная математическая модель;}$$

$$Y_i = F\{Y_{(i-1)}, U_{(i-1)}, i-1\} \text{ дискретная математическая модель,}$$

где $Y_i = Y(t_i)$

$$U_{(i-1)} = U(t_{i-1})$$

- по характеру взаимосвязи входов и выходов – **стохастические** при воздействии входных сигналов – выходные зависят от случайных факторов:

$$\dot{Y}(t) = F\{Y(t), U(t), \xi(t)\}$$

где $\xi(t)$ – вектор случайных возмущений.

Задачи контроля и диагностирования заключается в восстановлении вектора состояния. Если матрица коэффициентов H является не вырожденной и обращаемой тогда вектор Y_p может восстановлен по параметрам наблюдений

$\Delta Y = H^{-1} \Delta Z$ соответственно:

$$Y_p = Y + \Delta Y = Y + H^{-1} \Delta Z$$

$H = \frac{dh[Y(t)]}{dY}$ – матрица связи наблюдаемых параметров с вектором ошибок объекта диагностирования (ОД) реальным.

Модель наблюдения ошибок ОД_р

$$\Delta z(t) = H(t)x(t) + \theta(t);$$

Стохастические диагностические модели основываются на математических моделях исправного и реального объектов диагностирования (ОД). Векторы параметров состояния описываются дифференциальными уравнениями.

Для идеального ОД $\dot{Y}(t) = F[Y(t)]$;

Для реального ОД $\dot{Y}_p(t) = F[Y_p(t)] + G(t)\xi(t)$;

Где $\xi(t) = [\xi_1(t) \dots \xi_p(t)]^T$ – вектор возмущений действующий на ОД, характеризующийся ковариационной матрицей:

$$M[\xi(t)\xi^T(t-\tau)] = Q(t)\delta(t-\tau);$$

$\delta(t-\tau)$ – дельта функция

$G(t)$ – матрица интенсивности возмущений;

$M[\dots]$ – оператор математического ожидания/

Меры погрешности используемые для оценки точности решения:

- вектор ошибок – разность между точным и найденным решением;
- вектор невязок – количественная мера между правыми и левыми частями системы уравнений при подстановке в них вычислительного решения (эффективно в случаях отсутствия знаний точного решения, служит для проверки точности вычислений).

В результате формирования базы данных по результатам изменения вибрации роторной системы с использованием ее моделей, при последовательной дискретной выборке через равные интервалы времени, формируется числовой ряд, позволяющий применить для определения тенденций изменения ее технического состояния статистические методы анализа.

Как следует из анализа особенностей системы – для повышения точности результата необходимо применять кластеризацию данных в соответствии с доступными данными по входному воздействию на систему (температуре и давлении на входе в двигатель, вертикальной и горизонтальной перегрузке и т.д.) и сглаживающую фильтрацию данных.

Так как данные имеют значительные объемы информации для уменьшения затрат ресурсов можно использовать для выполнения таких

расчетных операций можно использовать инструменты нейросетевых методов анализа.

Точность получаемых результатов зависит от объема исходных данных для обучения нейросетевых моделей, что нужно учитывать при формировании прогнозов функционирования системы.

Таким образом, проведение диагностирование технического состояния роторных систем авиационных ГТД позволяет составить прогноз функционирования систем для обеспечения возможности эксплуатации ГТД по техническому состоянию и проведения перспективного планирования объема и сроков проведения работ по их техническому обслуживанию.

Список литературы:

1. Егоров И.В., Карасев В.А., Скибин В.А. Информационные технологии в диагностике технического состояния ГТД. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. 368 с.
2. Колодежный Л.П., Чернодаров А.В. Надежность и техническая диагностика. М.: Изд. ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. _452 с.

УДК 519.6

КОЛМАГОРОВ И. Д., ПЕШКОВ Р. А.

ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск, Россия

**ПРОБЛЕМА СХОДИМОСТИ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОЙ
НЕЙРОННОЙ СЕТИ К ТРИВИАЛЬНОМУ РЕШЕНИЮ
ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ**

***Аннотация.** На примере моделирования задачи обтекания пластины рассмотрены основные трудности обучения PINNs: нулевое поле, нарушение баланса масс, застревание в седловых точках, неустойчивость при сбросе оптимизатора. Обсуждаются возможные подходы к решению возникших проблем. Результаты могут быть использованы при разработке PINNs-моделей для авиационных приложений.*

***Ключевые слова:** PINNs, уравнения Навье-Стокса, обтекание пластины, машинное обучение, вычислительная гидродинамика, сходимость, оптимизация.*

PINNs применяются в вычислительной гидродинамике для моделирования обтекания элементов летательных аппаратов благодаря бессеточности, простоте учёта граничных условий и возможности обратного моделирования [1]. Однако PINNs часто сходятся к нефизичным решениям: нулевое поле скорости, занижение выходной скорости, нарушение баланса масс [2]. В работе на примере двумерного обтекания пластины систематизированы типичные проблемы и предложены методы

их диагностики. Для отработки обучения *PINNs* рассмотрена задача *VMFL063* из руководства «*Ansys Fluid Dynamics Verification Manual*» о разделении ламинарного потока пластиной (рис. 1): моделируется разделение потока по тупой передней кромке при ламинарном течении. Поток разделяется и снова соединяется вдоль пластины. Из-за симметрии моделируется только половина области. Течение описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\begin{cases} \nabla \vec{u} = 0 \\ (\vec{u} \nabla) \vec{u} + \left(\frac{1}{\rho} \right) \nabla p - \nu \nabla^2 \vec{u} = 0 \end{cases}$$

где $\vec{u}$ – вектор скорости; ∇ – оператор Гамильтона; ∇^2 – оператор Лапласа; ρ – плотность жидкости; p – давление; ν – кинематическая вязкость жидкости.

Граничные условия (таблица 1): левая – вход (*INLET*) с горизонтальной скоростью $u = |\vec{u}|$ (нормированной к 1) и вертикальной $v = 0$; правая граница – выход (*OUTLET*) с нулевым избыточным давлением; поверхность пластины – условие прилипания (*WALL*: $u = v = 0$); нижняя граница – симметрия (*SYMMETRY*: $v = 0, \partial u / \partial y = 0$).

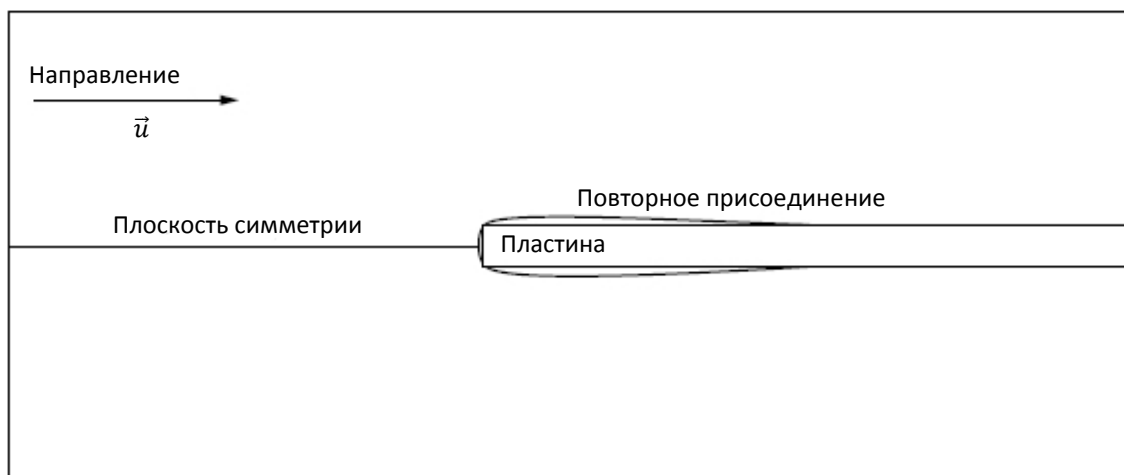


Рисунок 1 – Геометрия задачи *VMFL063*

Таблица 1. Условия задачи *VMFL063*

Свойства материала	Геометрия	Граничные условия
Плотность: 1 кг/м^3 ; Вязкость: $1,7898 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$.	Толщина пластины: 90 мм Длина пластины: 1500 мм	Скорость на входной границе: 0,0517 м/с

В ходе работ над моделью, было установлено, что высокое значение имеют веса компонент, составляющих функцию потерь:

$$Loss = W_{PDE} Loss_{PDE} + W_{BC} Loss_{BC} + W_{Flow} Loss_{Flow},$$

где $Loss$ – значение функции потерь; W_i – веса составляющих функции потерь; $Loss_{PDE}$ – невязка уравнений Навье-Стокса; $Loss_{BC}$ – ошибка в выполнении граничных условий; W_{Flow} – вес ошибки выполнения закона сохранения массы для всей расчётной области; $Loss_{Flow}$ – ошибка выполнения закона сохранения массы для всей расчётной области.

При этом $Loss_{PDE}$ и $Loss_{BC}$ представлены как сумма:

$$Loss_{PDE} = W_{Cont}Loss_{Cont} + W_{Mom}Loss_{Mom},$$

$$Loss_{BC} = \sum W_i Loss_i,$$

где W_{Cont} – вес невязки уравнения неразрывности; $Loss_{Cont}$ – невязка уравнения неразрывности; W_{Mom} – вес невязки уравнения сохранения импульса; $Loss_{Mom}$ – невязка уравнения сохранения импульса; W_i – вес границы (*INLET*, *OUTLET*, *WALL*, *SYMMETRY*), $Loss_i$ – ошибка в выполнении соответствующего граничного условия.

Так при большом значении W_{PDE} (в особенности W_{Cont}) имеет место седловая точка или локальный минимум [3], соответствующий нефизичному решению, при котором скорость по всей расчётной области равна 0, так как это представляет собой тривиальное решение уравнений вязкой несжимаемой жидкости. Нейронная сеть пренебрегает большими ошибками на входной границе, где задан вектор скорости, в пользу идеального решения (малые значения $Loss_{PDE}$) в остальной области (рис. 2).

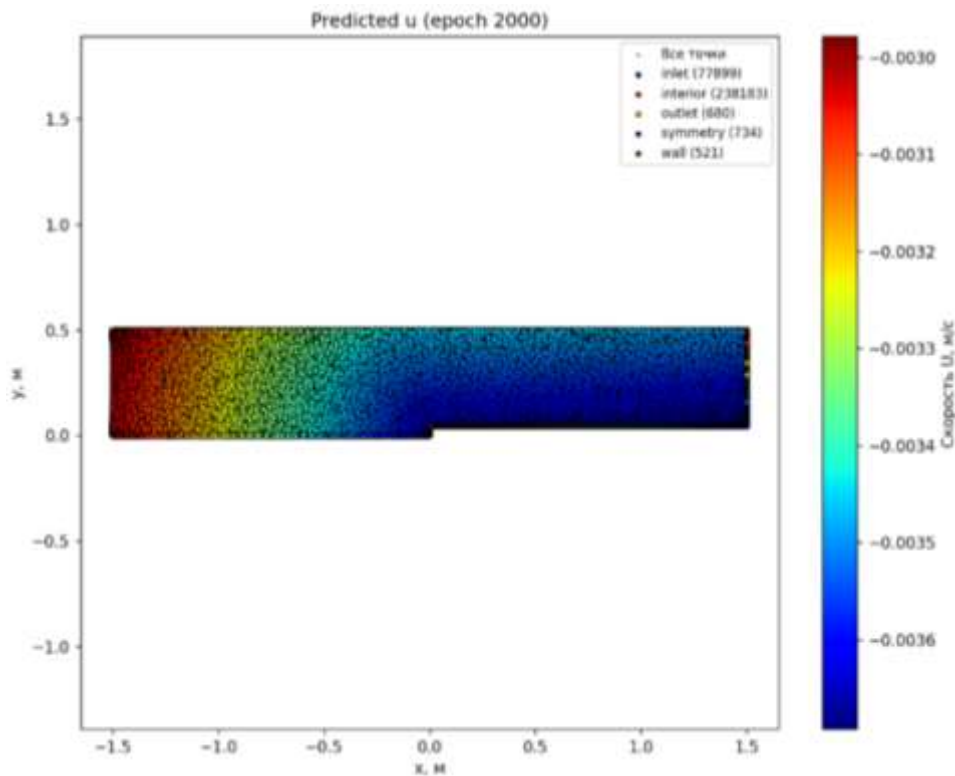


Рисунок 2 – Поле горизонтальной скорости при «перевесе» W_{PDE} (нулевое поле внутри)

Для борьбы с явлением нефизичных решений при обучении *PINNs* существует ряд методов, позволяющих вытолкнуть сеть из седловой точки или не позволить таким решениям образоваться.

Первое, что рекомендуется предпринять – увеличить веса других составляющих функции потерь, при этом, так как скорость на стенке и так равна нулю, а условие симметрии обеспечивает нулевую вертикальную компоненту на границе *SYMMETRY*, то имеет смысл сосредоточиться на настройке весов для входной и выходной границ. Также существуют методы адаптивных весов на границах и для точек в ядре потока. Однако сбалансированные веса не гарантируют выхода из области нефизичных решений: после увеличения весов сеть начинает быстро уменьшать $Loss_{BC}$, и как только значения потерь становятся сопоставимыми с $Loss_{PDE}$, тривиальное нефизичное решение снова становится выгодным.

Так в рассматриваемой задаче о течении несжимаемой жидкости возможен учёт потока (расхода массы) через входную и выходную границу:

$$Q_{inlet} - Q_{outlet} = Loss_{Flow},$$

где Q_{inlet} – поток через входную границу, Q_{outlet} – поток через выходную границу.

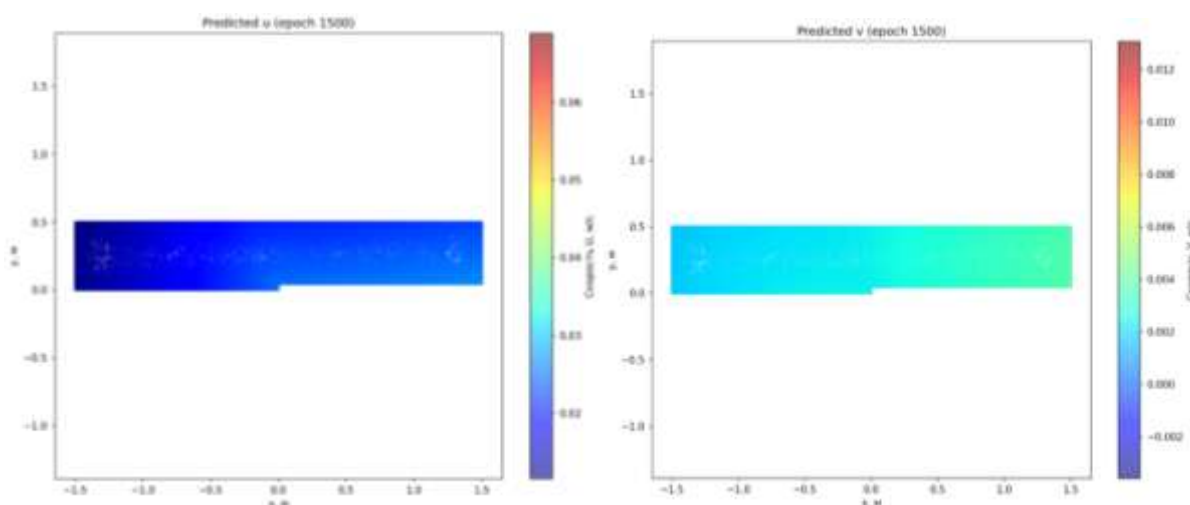


Рисунок 3 – Вертикальная компонента v составляет порядка 20 % от горизонтальной компоненты u в ядре потока, что позволяет выполняться условию сохранения массы при заниженной скорости потока

Метод с включением в функцию потерь расхода неприменим к сжимаемым жидкостям, так как в общем случае из-за переменности плотности поток массы на входе и выходе расчётной области не обязан быть равным. При этом *PINNs* могут адаптироваться иначе: скорости на входе и выходе обеспечивают требуемый расход, однако в ядре потока скорость остается близкой к нулю, либо возникает вертикальная составляющая v (рис. 3). В этом случае дефицит потока через

вертикальные границы компенсируется горизонтальными границами большей длины, благодаря чему поле скорости остаётся близким к нулю, что соответствует тривиальному решению уравнений гидродинамики.

Для того чтобы вывести сеть из нефизичного состояния, была предпринята попытка сброса оптимизатора с добавлением шума к параметрам. Данный приём часто используется для выхода из плато, однако он чувствителен к амплитуде шума: при чрезмерных значениях (например, 0,1) он может разрушить уже найденное решение, вызывая взрыв градиентов (рис. 4); слишком низкая амплитуда, в свою очередь, не позволяет покинуть плато. В проведённом эксперименте наблюдался взрыв градиентов, после которого сеть хотя и вышла на плато, но с более высоким значением невязки.

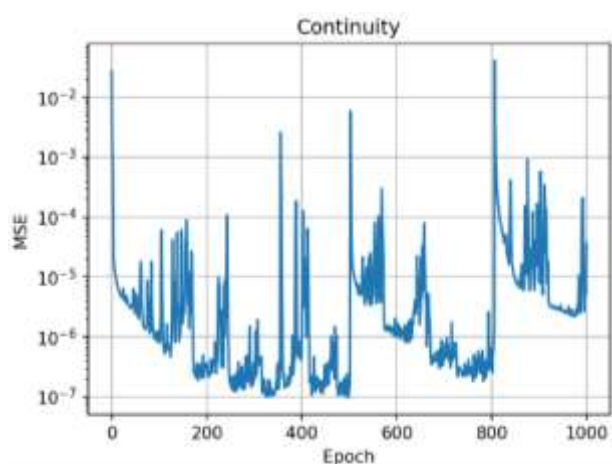


Рисунок 4 – Последствия сброса оптимизатора с шумом на примере невязки уравнения неразрывности: эпоха 350 – шум 0,01; эпоха 500 – шум 0,05; эпоха 800 – шум 0,01

Исследованы типичные проблемы обучения *PINNs* на примере задачи ламинарного обтекания пластины (*VMFL063*). Стандартная постановка с взвешенной суммой невязок *PDE* и граничных условий склонна к нефизичным решениям: доминирование невязки неразрывности приводит к нулевому полю скорости, игнорирующему условия входа. Учёт $Loss_{Flow}$ частично решает проблему, но может вызывать вертикальные течения, требуя более сложной регуляризации. Сброс оптимизатора с шумом нестабилен: малая амплитуда не выводит из плато, высокая – вызывает взрыв градиентов и разрушает решение.

Таким образом, недостаточно статических весов; необходимы адаптивная настройка функции потерь и мониторинг полей скорости. Планируется: внедрение *RAR* [4] для адаптивного сгущения точек коллокации в зонах высоких градиентов, *SA-PINNs* [5] и *Learning Rate Annealing* [6] для автоматической балансировки весов функции потерь, *hard constraints* [7] для жёсткого задания граничных условий, а также

исследование влияния распределений точек коллокации на точность пограничного слоя и сходимость.

Источник финансирования: грантовая программа Виктора Христенко «Шаг в будущее» (договор пожертвования № 240425 от 25.04.2024).

Список литературы

1. Raissi, Maziar & Perdikaris, Paris & Karniadakis, George. (2018). Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. *Journal of Computational Physics*. 378. 10.1016/j.jcp.2018.10.045.
2. Chen J, Yuan C, Xu J, Bie P and Wei Z (2024) DF-ParPINN: parallel PINN based on velocity potential field division and single time slice focus. *Front. Mar. Sci.* 11:1309775. doi: 10.3389/fmars.2024.1309775
3. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвиль А., Глубокое обучение / пер. с англ. А.А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652с.: цв. ил.
4. Wu, Chenxi & Zhu, Min & Tan, Qinyang & Kartha, Yadhu & Lu, Lu. (2023). A comprehensive study of non-adaptive and residual-based adaptive sampling for physics-informed neural networks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 403. 115671. 10.1016/j.cma.2022.115671.
5. McClenny, Levi & Braga-Neto, Ulisses. (2022). Self-adaptive physics-informed neural networks. *Journal of Computational Physics*. 474. 111722. 10.1016/j.jcp.2022.111722.
6. Nakamura, Kensuke & Derbel, Bilel & Won, Kyoung-Jae & Hong, Byung-Woo. (2021). Learning-Rate Annealing Methods for Deep Neural Networks. *Electronics*. 10. 2029. 10.3390/electronics10162029.
7. Lu, Lu & Pestourie, Raphaël & Yao, Wenjie & Wang, Zhicheng & Verdugo, Francesc & Johnson, Steven. (2021). Physics-Informed Neural Networks with Hard Constraints for Inverse Design. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 43. B1105-B1132. 10.1137/21M1397908.

УДК 629.7.01

ДАВЫДЕНКОВ А. В., ТАТАРОВ Г. Л.

Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

РАЗРАБОТКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА «СКАТ»

Аннотация. В статье изложены результаты концептуального проектирования беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолётного типа «Скат», предназначенного для длительного мониторинга, аэрофотосъёмки и патрулирования. Ключевым решением выступает процесс проектирования конструкции БПЛА с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющие детально проработать компоновку гибридной силовой установки (ДВС малого объема, генератор, буферный батарею), а также провести

оценочные аэродинамические расчеты. Описаны конструктивные особенности планера из отечественных композиционных материалов (КМ). Представлена разработанная 3D-модель аппарата в отечественной САД-системе КОМПАС-3D, подтверждающая реализуемость предложенных решений.

Ключевые слова: БПЛА, летающее крыло, аэродинамическая схема, КМ, гибридная силовая установка, энергоэффективность.

Отечественное беспилотное авиастроение на современном этапе ориентировано на создание аппаратов, которые сочетают экономичность, длительную автономность и полную независимость от импортных компонентов. Многие тяжёлые БПЛА оснащаются сложными и дорогими реактивными двигателями, тогда как лёгкие мультироторные системы имеют ограниченное время полёта (20–40 минут). Таким образом, одной из ключевых задач при проектировании БПЛА является рациональное использование внутреннего пространства планера для размещения полезной нагрузки и силовых агрегатов, а также достижение наилучших аэродинамических характеристик конструкции планера. Наиболее эффективно это решается с помощью инструментов 3D-моделирования.

В рамках проекта разработана цифровая 3D-модель БПЛА «Скат» по аэродинамической схеме «летающее крыло» с применением отечественных композитов и гибридной силовой установки.

Проектирование было выполнено в САД системе КОМПАС-3D. Это позволило детально проработать размещение основных элементов внутри конструкции планера:

1. Гибридной силовой установки (ДВС малого объема, генератор и буферные батареи)
2. Топливные баки и отсеки полезной нагрузки
3. Сервоприводы, поверхности управления (основные управляющие поверхности- элероны, совмещенные элероны и рули высоты)

За основу принята аэродинамическая схема «летающее крыло». В отличие от классической схемы, в ней в роли фюзеляжа выступает само крыло, а полезная нагрузка, топливо и силовая установка размещаются внутри несущего объёма крыла. Это даёт ряд существенных преимуществ: снижение массы конструкции на 15–20 % за счёт отказа от хвостового оперения; уменьшение лобового сопротивления благодаря отсутствию выступающих частей; повышение аэродинамического качества, что положительно сказывается на дальности и продолжительности полёта.

В проекте заложены следующие основные геометрические и массовые характеристики: максимальная взлетная масса – до 100 кг; масса полезной нагрузки – до 15 кг; продолжительность полета – 4–6 часов; крейсерская скорость – 100–120 км/ч. Достичь таких показателей предполагается за

счёт использования профиля крыла, оптимизированного для крейсерского режима с минимальным коэффициентом лобового сопротивления.

Визуализация аппарата, выполненная в системе 3D-моделирования КОМПАС-3D, представлена на рис. 1.

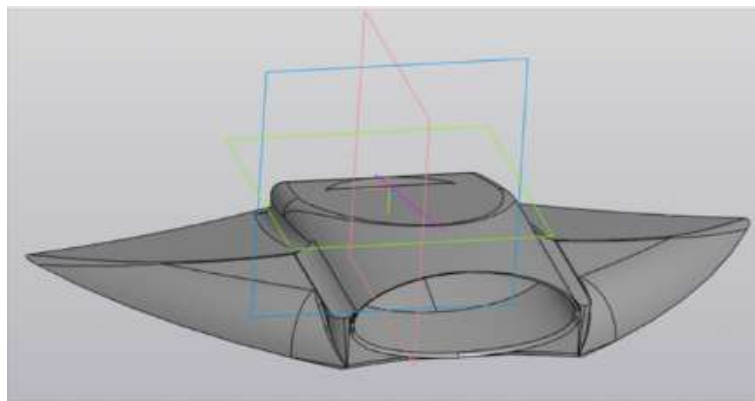


Рисунок 1 – Общий вид БПЛА «Скат» в КОМПАС-3D

Управление по крену и тангажу осуществляется элевонами – комбинированными рулями высоты и элеронами, расположенными на задней кромке крыла. Такое решение обеспечивает устойчивость и манёвренность, необходимые для выполнения аэрофотосъёмки, мониторинга и патрулирования, в том числе в сложных метеоусловиях.

При проектировании БПЛА «Скат» учитывалось использование отечественных КМ (углепластик и стеклопластик). Выбор данных материалов обусловлен высокими удельными характеристиками. Согласно классификации, приведённой в учебном пособии [1], полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных и стеклянных волокон отличаются высокой прочностью и жёсткостью при малой плотности, что позволяет создавать силовые элементы с минимальной массой.

Применение углепластика (углеродное волокно, пропитанное эпоксидным связующим) целесообразно для конструкций лонжеронов, нервюр и обшивки в зонах высоких нагрузок. Удельная прочность такого материала в 3–5 раз выше, чем у алюминиевых сплавов, что даёт возможность сократить массу планера на 25–30 % по сравнению с металлическими аналогами. Применение стеклопластика (стекловолокно на полиэфирной или эпоксидной матрице) было определено для менее нагруженных элементов: обтекателей, закрылков, неметаллических деталей. Он характеризуется высокой ударной вязкостью и стойкостью к коррозии.

Для проверки эффективности выбранной аэродинамической схемы на этапе проектирования был выполнен оценочный расчёт методами вычислительной гидродинамики (CFD). При взлетной массе 100 кг и площади крыла $S = 1,8 \text{ м}^2$, крейсерской скорости $V = 110 \text{ км/ч}$ (30,5 м/с) на

высоте 500 м число Рейнольдса составляет $R_e \approx 1,2 \times 10^6$. На основании этих расчетов коэффициент подъемной силы при крейсерском полете на высоте определен $C_L = 0,42$, в то время как коэффициент лобового сопротивления равен $C_D = 0,028$. Следовательно, максимальное аэродинамическое качество, обозначаемое как $K = C_L / C_D$ составляет приблизительно 15, что на 20-25% выше, чем у обычных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Результаты этих расчетов подтверждают, что использование конструкции летающего крыла, разработанной с использованием инструментов САПР, повышает аэродинамическую эффективность на 20-25% по сравнению с традиционными конфигурациями. При оценке энергоэффективности было установлено, что беспилотник «СКАТ» потребляет на 9% меньше энергии на километр полета, чем классические беспилотники самолетного типа, и на 25% меньше, чем мультироторные системы.

Реализация этого проекта потенциально может удовлетворить разнообразные потребности клиентов как государственного, так и частного секторов. Кроме того, проект способствует достижению национальной цели – технологический суверенитет в области беспилотных летательных аппаратов за счет использования отечественных технологий.

Предлагаемая конструкция беспилотного летательного аппарата, выполненная по схеме "летающее крыло", разработанной с использованием передовых технологий САПР, обладает выдающимися конкурентными характеристиками: временем полёта до 4–6 часов и сниженным на 9–15 % удельным расходом энергии. Использование отечественного ПО и материалов в процессе проектирования напрямую способствует обеспечению технологического суверенитета в области отечественной беспилотной авиации.

Список литературы

1. Зинкин, Н. Ю. 3D-моделирование как инструмент преподавания технических дисциплин / Н. Ю. Зинкин, Г. Л. Татаров // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2022): Сборник научных статей по материалам XIX Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры «Вычислительная техника» ПГУ, Пенза, 17–18 ноября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2022. – С. 465-467. – EDN KDAJBM.
2. Зотов, А. А. Композиционные материалы: классификация, состав и структура, свойства: учебное пособие / А. А. Зотов, В. И. Резниченко. – Москва: Издательство МАИ, 2020. – 143 с. – ISBN 978-5-4316-0796-9.
3. Лемаева, М. Н. Оценка влияния внедрения ERP-систем на авиапредприятиях / М. Н. Лемаева, А. А. Григорьева // Эффективное управление в социальных и технических системах в условиях глобальной нестабильности: Сборник материалов I Международной научно-практической конференции. Посвящается 90-летию Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Ульяновск, 18 декабря 2025 года. – Ульяновск: Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, 2026. – С. 55-57. – EDN RHWFPN.

4. Пугачева, Е. Б. Анализ конструкций беспилотников Скат / Е. Б. Пугачева, Е. Е. Федоренко, Г. Л. Татаров // Современные технологии и инновационные решения в области технических наук: сборник научных статей. – Москва : СИГМА, 2024. – С. 116-120. – EDN ENWGCC.

УДК 621.437.32

ЕПИФАНОВ А.В., ФРИБУС В.С., ТАТАРОВ Г.Л.

Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БПЛА

***Аннотация.** В статье рассмотрена возможность применения цикла Аткинсона в роторном двигателе для беспилотных летательных аппаратов. Обоснован выбор цикла Аткинсона для лабораторного прототипа, приведены базовые расчетные зависимости и показано, каким образом изменение фазы эффективного сжатия может использоваться для повышения экономичности и снижения тепловой напряженности силовой установки.*

***Ключевые слова.** роторный двигатель, БПЛА, цикл Аткинсона, цикл Отто, эффективная степень сжатия, тепловой цикл.*

Разработка малогабаритной и экономичной силовой установки для БПЛА относится к числу актуальных инженерных задач. Для аппаратов, выполняющих длительные полетные миссии, определяющими становятся продолжительность работы, надежность, малая вибрация и приемлемый ресурс. Электрические силовые установки удобны в эксплуатации, однако ограничены емкостью аккумуляторов, поэтому в сегменте средних и тяжелых платформ сохраняется потребность в двигателях внутреннего сгорания.

Проект роторного двигателя для БПЛА ориентирован на создание отечественной силовой установки с компактной компоновкой, низкой вибронагруженностью и приемлемой стоимостью эксплуатации. В настоящей работе основное внимание уделено не максимизации пиковой мощности, а повышению эффективности на крейсерских режимах.

В настоящей работе в качестве базовой принята роторно-лопастная схема двигателя, ориентированная на применение в составе силовой установки БПЛА. Выбор такой схемы обусловлен сочетанием компактности, малого уровня вибраций и возможности получить непрерывный рабочий процесс в ограниченном объеме силового отсека. Его основное строение включает неподвижный цилиндрический корпус (статор) с впускными/выпускными окнами, две пары лопастей (роторов), вращающихся соосно, и механизм синхронизации/преобразования

движения, который заставляет лопасти сближаться и удаляться, создавая рабочие камеры (рис.1).

Наибольшую роль в обеспечении работоспособности играют надежная герметизация переменных полостей, стабильная смазка контактных поверхностей и снижение локальных перегревов в зоне максимальных температур. Поэтому при анализе выбранной конструкции основное внимание целесообразно уделять не сравнению с альтернативными роторными машинами, а согласованию геометрии впуска и выпуска, режима сгорания и условий работы уплотнений. Именно такое сочетание конструктивных и тепловых факторов определяет перспективность предлагаемого двигателя для отечественных беспилотных авиационных систем.

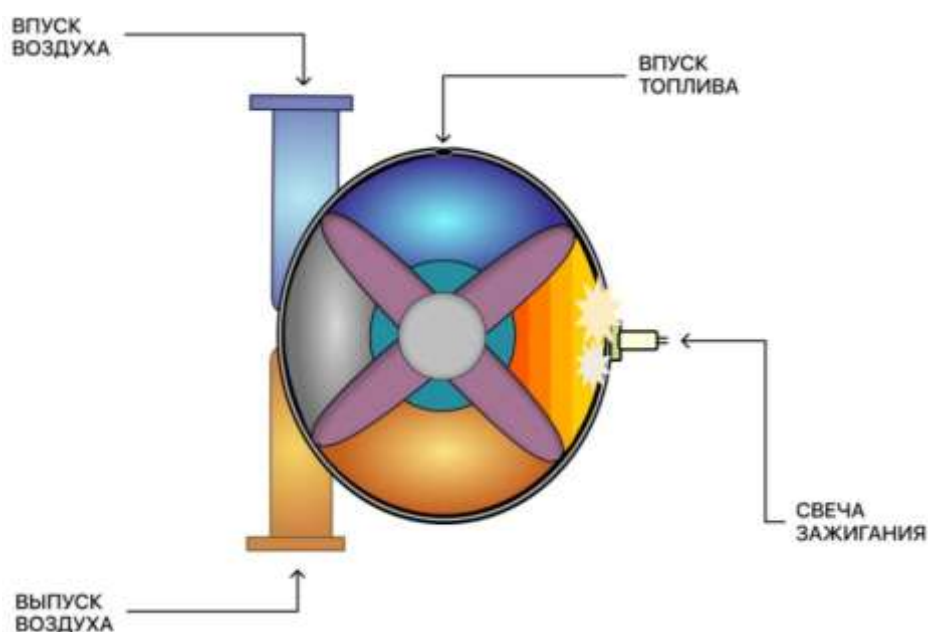


Рисунок 1 – Схема роторно-лопастного двигателя. Изображение иллюстрирует компоновку корпуса, ротора, камер переменного объема, неподвижной шестерни и свечей зажигания.

В качестве базового для бензиновых двигателей обычно принимается цикл Отто, при котором степени сжатия и расширения близки. Такой цикл дает высокую удельную мощность, но часть энергии покидает двигатель вместе с горячими выхлопными газами. Для БПЛА, значительную часть времени работающих на частичной нагрузке, более рационален цикл Аткинсона, в котором степень расширения превышает эффективную степень сжатия. Это позволяет более полно использовать энергию продуктов сгорания, снизить температуру выхлопа и уменьшить удельный расход топлива.

Главное различие между рассматриваемыми циклами состоит в соотношении между эффективным сжатием и расширением. Для цикла

Отто эти величины близки, тогда как в цикле Аткинсона расширение остается большим, а сжатие начинается позже. За счет этого уменьшаются давление и температура в конце сжатия, снижается температура выхлопа и повышается экономичность на частичных режимах. Недостатком является уменьшение предельной удельной мощности и более высокие требования к настройке впуска, смесеобразования и зажигания.

С конструктивной точки зрения реализация цикла Аткинсона, в роторно-лопастном двигателе может быть достигнута без существенного усложнения кинематической схемы. Основное воздействие на рабочий процесс оказывает форма и протяженность впускного окна. Если момент фактического начала сжатия смещается по ходу вращения, часть заряда не участвует в полном геометрическом сжатии, и тем самым эффективная степень сжатия уменьшается относительно геометрической. При этом ход расширения сохраняется близким к максимально возможному, что и формирует полезный эффект.

Для предлагаемой конструкции рабочий процесс может быть описан следующим образом. На первом участке через впускное окно в камеру поступает воздух или топливовоздушная смесь. Далее при повороте ротора объем камеры уменьшается, и в верхнем сегменте формируется сжатый заряд. После воспламенения продукты сгорания расширяются и создают давление на лопасти, обеспечивая крутящий момент на валу. Затем отработавшие газы удаляются через выпускной сегмент, и цикл повторяется (рис.2). Двухтактный характер процесса позволяет получить компактную и энергетически насыщенную силовую установку, что особенно важно для БПЛА с ограниченным объемом силового отсека.

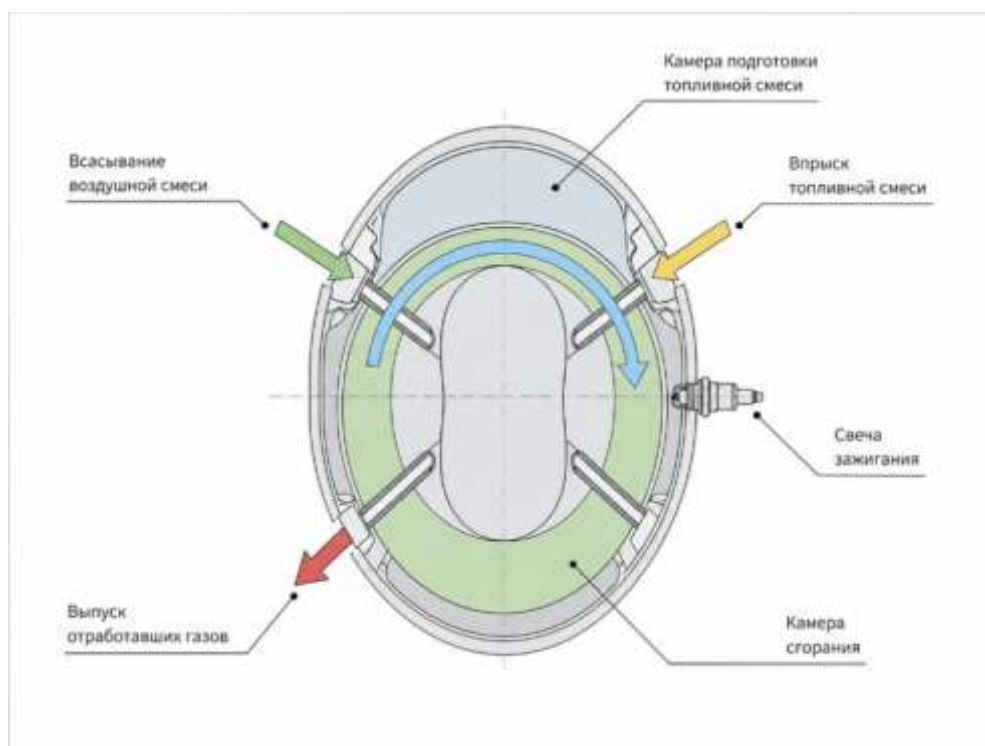


Рисунок 2 – Схема описания рабочего процесса. Изображение иллюстрирует четыре последовательных такта: впуск, сжатие, рабочий ход, выпуск

Наиболее критичными узлами при такой схеме являются торцевые и радиальные уплотнения, а также поверхности контакта ротора с корпусом. Поэтому при дальнейшей доводке конструкции особое внимание должно уделяться подбору антифрикционных материалов, обеспечению стабильного масляного слоя и снижению локальных перегревов в зоне камеры сгорания. С инженерной точки зрения именно сочетание рациональной геометрии впуска, надежной системы уплотнения и приемлемого теплового режима определяет возможность практического применения подобного двигателя на беспилотной платформе.

Применительно к задачам БПЛА предложенная схема обладает рядом эксплуатационных преимуществ. Во-первых, роторно-лопастной двигатель имеет меньший уровень вибраций по сравнению с поршневой машиной сходной мощности. Во-вторых, компактная компоновка упрощает интеграцию двигателя в фюзеляж или центральный отсек аппарата. В-третьих, при рациональной настройке цикла Аткинсона можно ожидать снижения удельного расхода топлива и температуры выхлопа, а это непосредственно связано с увеличением продолжительности полета, снижением тепловой заметности и улучшением ресурса нагруженных деталей.

Отдельно следует отметить и прикладной аспект проекта. Для средних и тяжелых беспилотных платформ, ориентированных на мониторинг, геодезические работы, охрану объектов и длительные маршрутные полеты, наличие компактного двигателя внутреннего сгорания остается востребованным решением, так как электрические силовые установки ограничены емкостью аккумуляторов и временем восстановления готовности между вылетами. В этом отношении роторно-лопастная схема представляет интерес как компромисс между компактностью, ремонтпригодностью и энергетической эффективностью.

Для определения научно-технической новизны и рыночного потенциала разрабатываемого роторно-лопастного двигателя с циклом Аткинсона был проведен сравнительный анализ с наиболее близкими по массогабаритным характеристикам и назначению установками: Austro Engine AE50R и серией Rotron RT600 (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ разрабатываемого РЛД с коммерческими аналогами

Параметр	Разрабатываемый РД	Austro Engine AE50R	Rotron RT600
Удельный	Низкий	Средний/Высо	Средний

Параметр	Разрабатываемый РД	Austro Engine AE50R	Rotron RT600
расход топлива		кий	
Уровень вибраций	Минимальный	Средний	Средний/Высокий
Сложность уплотнений	Средняя	Высокая	Высокая
Основной режим работы	Длительный полёт	Макс. мощность	Макс. мощность

В работе показано, что для данного класса силовых установок приоритетом выступают экономичность, допустимый температурный режим и ресурс, а не предельная пиковая мощность. Разделение геометрической и эффективной степеней сжатия позволяет описать механизм повышения термической эффективности и дает основу для дальнейшего расчета.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связывать с углублением инженерной проработки уже выбранной схемы. Прежде всего требуется провести оценку газообмена и распределения температур по корпусу, а также исследовать напряженно-деформированное состояние узлов уплотнения. Отдельной задачей остается экспериментальная проверка запуска, устойчивости работы на частичных нагрузках и влияния выбранного цикла на расход топлива и температуру выхлопа.

Список литературы

1. Вырубов Д. Н., Иващенко Н. А., Ивин В. И. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
2. Луканин В. Н., Морозов К. А., Хачиян А. С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 1: Теория рабочих процессов. М.: Высшая школа, 1995. 368 с.
3. Колчин А. И., Демидов В. П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 496 с.
4. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 403 с.

УДК (004.942)

**АСТАНИН Н.Н., АФОНИН А.В., ЗАГОРДАН А.А., СОШНИКОВ А.М.,
ЧУХОНЦЕВ С.В.**

ООО «Волга-Днепр Инжиниринг», г. Ульяновск, Россия

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ САПР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЪЕМНОГО РОЛИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ГЕНЕРАЛЬНЫХ ГРУЗОВ НА АВИАЦИОННЫХ ПАЛЛЕТАХ В ВОЗДУШНЫХ СУДАХ ТИПА АН-124-100

***Аннотация.** В статье представлен комплекс работ, выполненных с использованием современных САПР (CAD/CAE) в рамках проектирования роликового оборудования, предназначенного для загрузки генеральных грузов на авиационных паллетах в грузовую кабину транспортного самолета Ан-124-100. Результатом работы стали: изготовленный комплект оборудования, выполненные функциональные, прочностные и сертификационные испытания.*

***Ключевые слова:** самолет Ан-124-100, САПР, CAD/CAE, авиационные паллеты, роликовое оборудование, испытания, конечно-элементный анализ, генеральные грузы.*

В начале 2020 года в связи с объявлением ВОЗ пандемии коронавирусной инфекции (COVID-19) в авиационной отрасли резко возросла потребность в перевозках генеральных грузов: медицинских препаратов, средств индивидуальной защиты медицинского персонала, аппаратов искусственной вентиляции лёгких и других грузов. Перевозки осуществлялись как в рамках обычных коммерческих рейсов, так и в рамках гуманитарных миссий с использованием стандартных средств пакетирования - ULD (Unit Load Device). ULD – это стандартизированное авиационное средство пакетирования, представляющее собой контейнер, поддон с грузом либо комбинацию поддона (паллеты) и сетки для группировки и фиксации груза, почты и багажа.

Авиакомпания «Волга-Днепр» выполнила ряд гуманитарных рейсов в страны, наиболее пострадавшие от пандемии.

Для доставки грузов были задействованы самолеты Ан-124-100, основным преимуществом которых по сравнению с основными конкурентами (Boeing 747, Boeing 777) является объём грузовой кабины, позволяющий загрузить около 1000 м³ груза.

Однако, в отличие от самолетов Boeing, в конструкции грузовой кабины Ан-124-100 отсутствует интегрированная роликовая система, обеспечивающая автоматизированную погрузку стандартных ULD.

Ввиду отсутствия аналогичного оборудования на Ан-124-100, загрузка таких грузов на паллетах осуществлялась с использованием виловых

погрузчиков, которые перемещались внутри грузовой кабины и размещали грузы на продольных и поперечных брусках (ложементах) в соответствии с требованиями эксплуатационной документации [1].

Суммарное время выполнения таких работ составляло около 10 – 12 часов и более, что негативно влияло на рентабельность таких перевозок.

Для сокращения времени погрузочно-разгрузочных работ и обеспечения загрузки и выгрузки авиационных паллет без применения вилочных погрузчиков руководством авиакомпании была поставлена задача спроектировать и изготовить съёмное роликовое оборудование, обеспечивающее загрузку и выгрузку таких грузов в Ан-124-100 с использованием стандартизированных авиационных средств.

К новому типу оборудования предъявлялись следующие требования:

- обеспечение загрузки в грузовую кабину самолёта максимально возможного объёма грузов;
- обеспечение перемещения, позиционирования и фиксации грузов на стандартизированных паллетах (типа РМС, РГА и т.п.) внутри грузовой кабины;
- выполнение погрузки и выгрузки через задний грузовой люк с применением штатного наземного оборудования (хайлоудеров);
- сокращение трудоёмкости погрузочно-разгрузочных работ в 1,5-2 раза по сравнению с погрузкой вилочными погрузчиками;
- обеспечение возможности ручной загрузки паллет силами 3-6 членов технической бригады в зависимости от массы паллеты;
- обеспечение возможности использования переносной электрической лебедки для загрузки тяжёлых грузов;
- снижение риска повреждения конструкции воздушного судна (рампы, грузового пола и других элементов);
- исключение вероятности травмирования членов технической бригады при использовании вилочных погрузчиков;
- улучшение распределения нагрузок на пол грузовой кабины по сравнению с погрузкой вилочным погрузчиком.

Кроме того, в соответствии с требованиями эксплуатационной документации [0] конструкция оборудования должна была обеспечивать беспрепятственную посадку и высадку членов экипажа, доступ к лючкам осмотра ниш основной опоры шасси, механизмам подтяга створок основных опор шасси, а также свободное перемещение персонала вдоль бортов.

Проектирование составных частей оборудования выполнялось с использованием САД-систем CATIA (моделирование оборудования для заднего грузолюка) и SolidWorks (общая компоновка в грузовой кабине и детализировка). Прочностные расчёты были проведены методом конечных элементов в программном комплексе Ansys. Для основных

конструктивных узлов (поперечных балок, роликовых дорожек, замков фиксации, переходных элементов) были разработаны конечно-элементные модели и определены расчётные случаи нагружения в соответствии с требованиями Норм летной годности НЛГС-3 [4] и сертификационного базиса модификаций самолета Ан-124-100. Перед началом проектирования был выполнен детальный анализ элементов конструкции грузовой кабины (лестниц, лючков, входов в кабину сменного экипажа и обслуживающего персонала) для обеспечения безопасного доступа к ним при эксплуатации нового оборудования.

С учетом вышеизложенных требований и ограничений было спроектировано съемное роликовое оборудование, состоящее из двух основных модулей:

1. Оборудование, устанавливаемое в грузовой кабине.
2. Оборудование, устанавливаемое на рампе и гермотрапе заднего грузового люка.

Разработанное оснащение позволяет загружать следующие типы паллет:

Тип и количество используемых паллет	PMC	PGA	PRA
	24 шт.	10 шт.	14 шт.
Максимальная масса груза на паллете	6,8 т	13,6 т	11,3 т

Пример компоновки с максимально возможной загрузкой приведен на Рисунке 1.

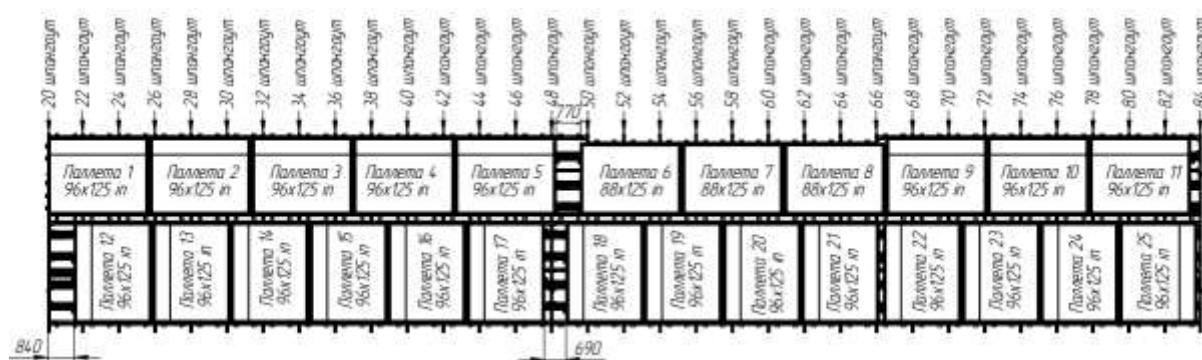


Рисунок 1 – Пример компоновки паллет (вид сверху)

Оборудование, установленное в грузовой кабине, предназначено для перемещения и фиксации паллет. Его крепление к полу осуществляется при помощи штатных швартовочных узлов через специальные переходные элементы, которые также обеспечивают дополнительную швартовку грузов бортовыми средствами (цепями, ремнями). Конструктивно оборудование состоит из поперечных балок, закрепляемых на силовых шпангоутах фюзеляжа, и роликовых дорожек, монтируемых между ними с помощью быстросъемных фиксаторов. Роликовые дорожки могут устанавливаться в различных комбинациях в зависимости от типа паллет.

Оборудование, устанавливаемое на рампе и гермотрапе заднего грузового люка, обеспечивает перемещение и разворот паллет, передаваемых с хайлоудера. Перед полётом данное оборудование демонтируется. Разворот паллет на рампе осуществляется за счёт применения шариковых панелей.

Фиксация паллет с грузом выполняется с использованием замков и упоров, количество и расположение которых соответствуют требованиям международных стандартов [2, 3] и эксплуатационной документации [1].

Для быстрой и правильной сборки оборудования на его элементах предусмотрены цветовая и цифровая маркировки.

Поскольку оборудование эксплуатируется на воздушном судне, оно должно соответствовать требованиям Авиационных правил [3] и сохранять прочность во всём диапазоне эксплуатационных нагрузок, включая аварийные ситуации.

Для подтверждения соответствия предъявляемым требованиям прочности были определены основные расчётные случаи нагружения, разработаны конечно-элементные модели (примеры приведены на Рисунках 2 и 3) и выполнены расчёты методом конечных элементов в Ansys.

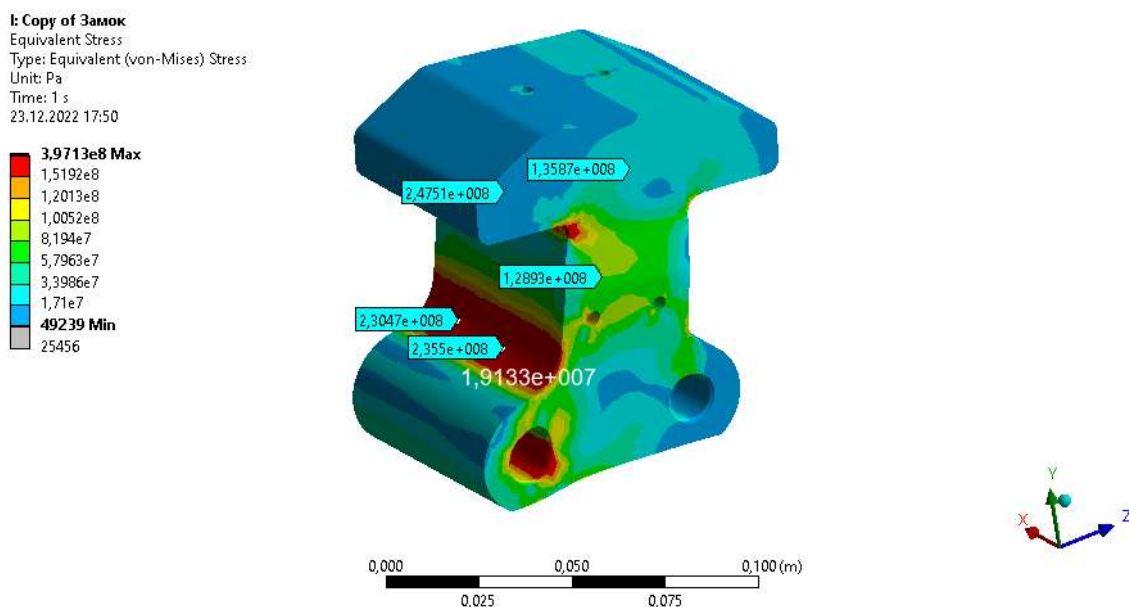


Рисунок 2 – Пример конечно-элементной модели упора

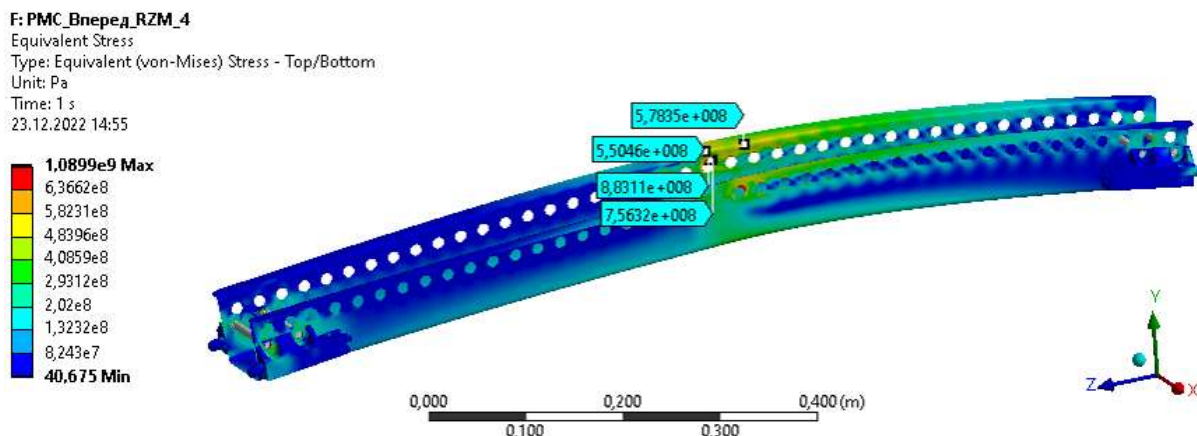


Рисунок 3 – Пример конечно-элементной модели балки

После выполнения прочностных расчетов и уточнения CAD-моделей был разработан комплект РКД для изготовления оборудования и проведения испытаний.

На изготовленном комплекте оборудования были проведены три вида испытаний:

- функциональные испытания (2021 г.) на базе аэропорта «Ульяновск-Восточный» с целью проверки работоспособности системы внутри самолета и правильности принятых конструктивных решений;
- функциональные испытания (2021 г.) в аэропорту г. Казани с целью проверки взаимодействия с наземными средствами, имитирующими условия реальной погрузки и выгрузки грузов, а также уточнения РКД;
- сертификационные испытания (2022 г.).

Особо ответственные узлы (элементы фиксации паллет) подвергались статическим испытаниям для определения уровня разрушающих нагрузок и их сопоставления с результатами прочностных расчётов.

Испытания элементов фиксации паллет, проводились на базе Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева на испытательной машине УРС-50/50. Результаты испытаний показали, что разрушающие нагрузки для особо ответственных элементов превышают расчетные значения более чем в 5 раз.

Применение современных САПР в рамках данного проекта позволило:

- оперативно выполнить многовариантную компоновку оборудования с учётом ограничений по доступу к элементам конструкции самолёта;
- сократить объем натурных испытаний;
- снизить трудоёмкость погрузочно-разгрузочных работ с 10-12 до 5-6 часов;
- исключить использование вилочных погрузчиков внутри грузовой кабины, что повысило безопасность персонала и снизило риск повреждения конструкции воздушного судна.

Список литературы:

1. Руководство по загрузке и центровке самолета Ан-124-100, 2003.
2. IATA ULD Regulations. – 7th ed. – Montreal: International Air Transport Association, 2021.
3. ISO 4171:2007. Air cargo equipment – Interline pallets. – Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
4. НЛГС-3. Нормы лётной годности гражданских самолётов СССР, 1984. – 447 с.

УДК 629.7.02

ЯБЛОНСКИЙ А.Н., ПЕТРОВ П.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева-КАИ, г. Казань, Россия

**РАЗРАБОТКА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ/ ДОСТАВКИ/ АЭРОФОТОСЪЁМКИ**

***Аннотация.** В настоящем проекте был представлен БПЛА модульной структуры весом до 30 кг и грузоподъёмностью до 7 кг, с возможностью быстрого изменения компоновки для выполнения различных задач благодаря модульной структуре. Разработаны ключевые концепции модульной структуры, включая классическую самолётную схему, октокоптер и истребитель с вертикальным взлётом. Проект включает полный цикл разработки: выбор компоновки, создание геометрических моделей, компоновочные, прочностные, аэродинамические расчеты, топологическое оптимизирование, с использованием КЭМ, а также изготовление полномасштабного прототипа и подготовку к летным испытаниям.*

***Ключевые слова:** Беспилотные летательные аппараты, модульность, многофункциональность, аддитивные технологии, конечно-элементное моделирование.*

Актуальность настоящей работы обусловлена преимуществами применения модульной компоновочной схемы по сравнению с традиционными конструктивными решениями БПЛА, модульный БПЛА – это беспилотный летательный аппарат, конструкция которого позволяет заменять его части (модули) в зависимости от конкретной задачи. Это значит, что вместо использования нескольких разных БПЛА для разных целей, один модульный БПЛА может быть переоборудован для выполнения различных задач. Что позволяет производить оснащение различных предприятий, и не только, универсальным БПЛА, с возможностью быстрого переклассифицирования под потребные задачи здесь и сейчас [1]. Применение модульной архитектуры способствует снижению совокупных затрат на закупку и обслуживание техники. Это

приводит к повышению экономической эффективности и гибкости использования беспилотных авиационных систем [2].

Ниже представлены разработанные концепты различных полетных схем БПЛА. Данные схемы реализуются за счет замены пары модулей (крыла, оперения, двигательной установки) на основе основного центрального модуля – фюзеляжа (Рисунок 1).

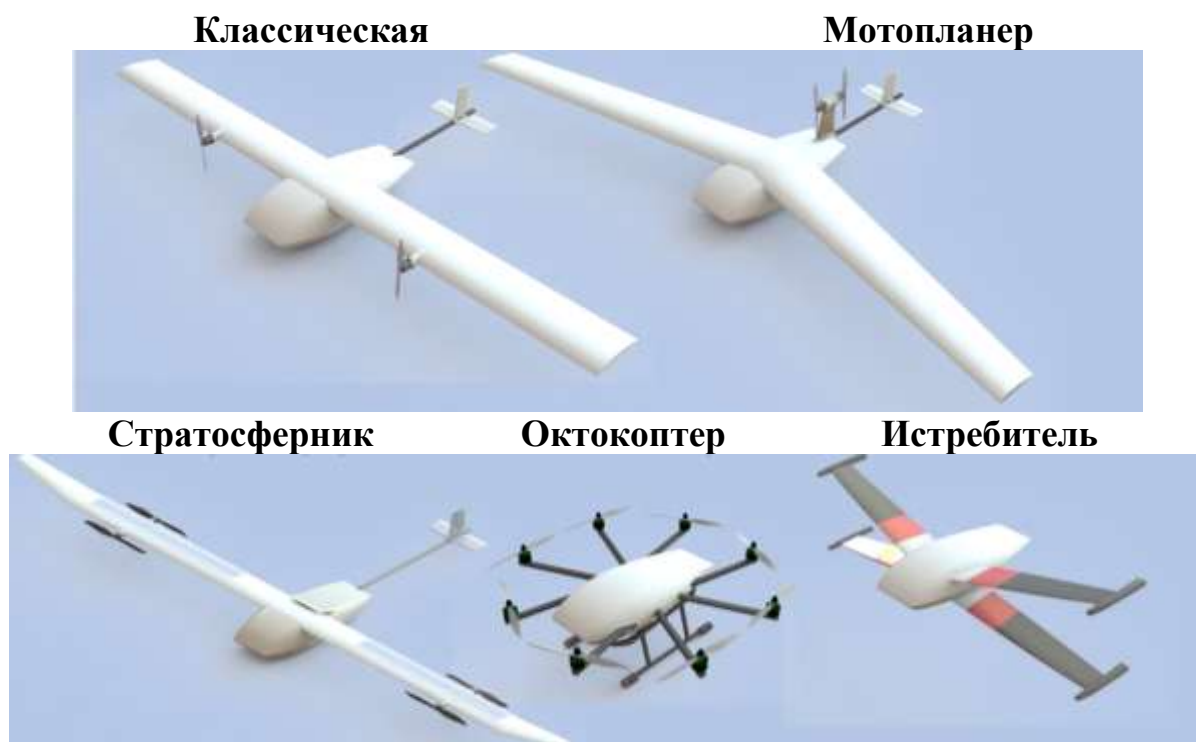


Рисунок 1 – Предлагаемые концепты БПЛА модульной схемы

Далее, проиллюстрированы основные этапы разработки БПЛА на примере проработки первого концепта – классической самолетной схемы.

Определение параметров компоновки в первом приближении

Первоначальным этапом было проведение расчетов компоновки в первом приближении с использованием формул, аналогичных при проектировании сверхлёгких ЛА. Были подобраны параметры потребной площади крыла эффективного удлинения, размеров хвостового оперения и эффективного «плеча» относительно центра давления планера, определение необходимого диапазона центровки.

После выполнения компоновочного расчёта в первом приближении и определения основных массово-габаритных характеристик был осуществлён выбор аэродинамических профилей крыла и фюзеляжа, соответствующих заданным требованиям.

В качестве базового профиля крыла принят CLARK Y 11%, обеспечивающий благоприятное соотношение подъёмной силы и

сопротивления и устойчивые характеристики в рабочем диапазоне углов атаки. Форма фюзеляжа основана на профиле GEO-460.

Двояко-симметричная форма обеспечивает хорошую обтекаемость и снижает паразитное сопротивление. А также, исключает появление дополнительных аэродинамических моментов.

Расчет аэродинамических с помощью КЭМ

Была построена геометрическая модель аэродинамического контура БПЛА и проведена серия аэродинамических расчетов с использованием методов конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent (Рисунок 2).

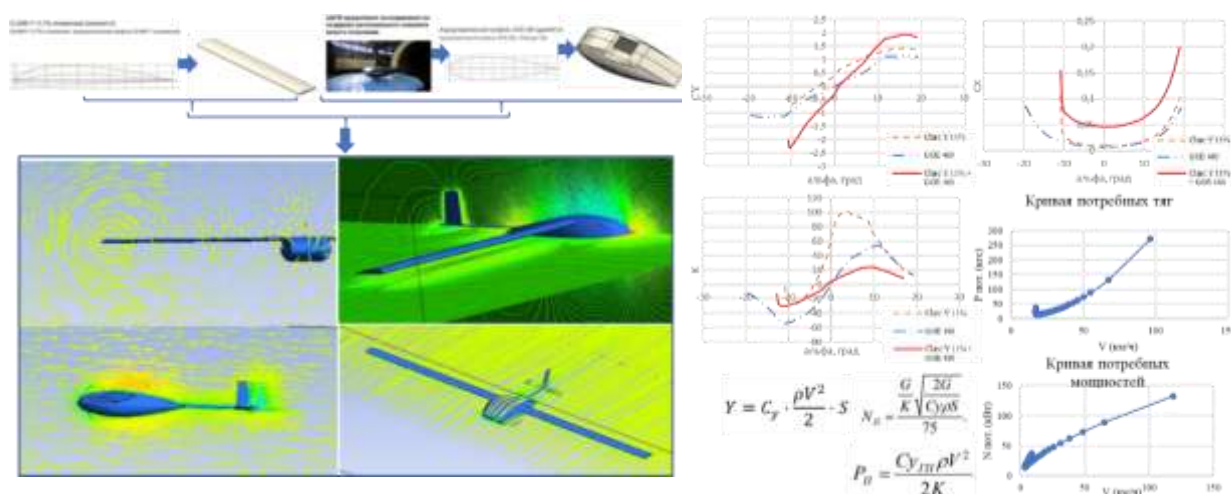


Рисунок 2 – Проведение расчетов аэродинамики, анализ результатов

Разработка конструктивно-силовой схемы фюзеляжа

Конструкция представляет собой внутренний силовой каркас из фанеры, нарезаемых из единого листа путем лазерной резки, элементов соединения, элементов управления и хвостового оперения из пластика, изготавливаемых путем 3 д печати, обшивки, быстростъемных баков и крыла из пенопласта авиационного класса (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Используемые материалы в конструкции БПЛА

Элементы конструкции внутреннего силового каркаса были упрощены, благодаря использованию топологического оптимизирования. Что позволило существенно снизить полётный вес планера, сохраняя жесткость конструкции (Рисунок 4).



Рисунок 4 – Оптимизация геометрии элементов каркаса

Предусмотрена быстросъёмная система крепления внешних баков, для реализации возможности быстрой замены использованных аккумуляторных блоков/баков с химикатами (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Отделение быстросъёмных баков от планера БПЛА

Используемые материалы и методы изготовления позволили существенно снизить себестоимость планера БПЛА, а модульная система соединений и креплений, позволяет производить быструю замену поврежденных элементов конструкции.

Анализ прочности элементов конструкции

В работе особое внимание было уделено расчету прочностных характеристик конструкции исходя из действующих во время различных режимов полета нагрузок, полученных по результатам расчетов аэродинамики ранее (Рисунок 6).



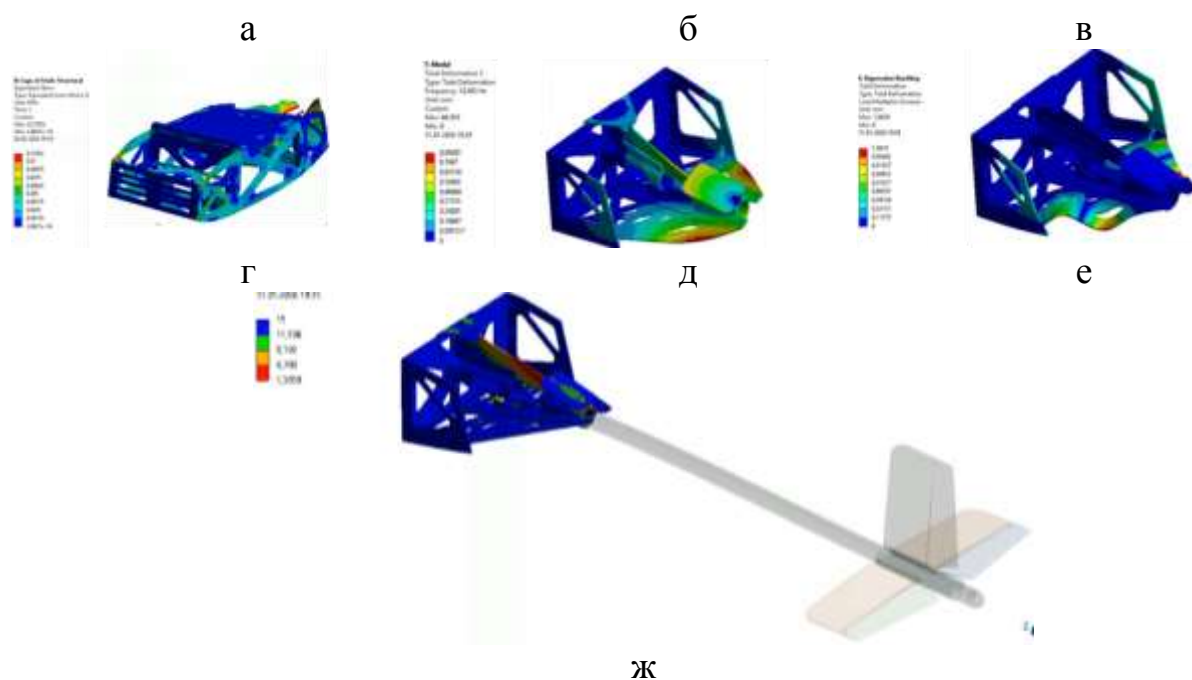


Рисунок 6 – Результаты расчетов

а – Перемещения крыла-каркаса, б – Напряжения крыло-каркас, в – Потеря устойчивости каркаса, г – Напряжения при кручении, д – Потеря устойчивости узла крепления, е – Собственные частоты узла крепления, ж – Определение запасов прочности

Изготовлен полноразмерный прототип планера БПЛА, начата подготовка к летным испытаниям (Рисунок 7).



Рисунок 7 – изготовленный и собранный планер БПЛА

Список литературы

1. Лукманов Ф. Ф. Разработка методики применения беспилотных летательных аппаратов для тушения пожаров, проведения аварийно-спасательных, поисковых и других неотложных работ //Актуальные исследования. – 2025. – №. 2 (237). – С. 41-43.

2. Давыдов А. Д. Моделирование и оценки основных составляющих технико-экономической эффективности модульных БПЛА с учетом влияния унификации //Московский экономический журнал. – 2023. – №. 3. – С. 439-451.

СЕКЦИЯ 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ОБУЧЕНИЯ КАДРОВ ДЛЯ АВИАСТРОИТЕЛЬНЫХ И АВИАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 331.36

АБДУРАХМАНОВА А.И., НАДРЕЕВА Л.Л.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

АДАПТАЦИЯ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ В АВИАСТРОЕНИИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КАЗАНСКОГО АВИАЦИОННОГО ЗАВОДА ИМ. С.П. ГОРБУНОВА)

***Аннотация.** В статье рассматривается положение молодых специалистов как уязвимой и одновременно перспективной категории персонала авиастроительного предприятия. На примере Казанского авиационного завода им. С.П. Горбунова проанализированы существующие механизмы адаптации, наставничества и обучения. Выявлены поколенческие разрывы между ожиданиями молодёжи и реальными условиями труда в промышленности. Предложены меры по трансформации системы работы с молодыми кадрами с учётом ценностных установок поколений.*

***Ключевые слова:** молодые специалисты, авиастроение, развитие персонала, наставничество, Казанский авиационный завод*

На данный момент авиастроительная отрасль России проходит два разных этапа. С одной стороны, по данным опросов ВЦИОМ 2024–2025 годов, престиж инженерной профессии после пика в 2024 году снизился, а доля негативных оценок выросла с 21 % до 29 % [1]. С другой стороны, предприятия остро нуждаются в притоке молодых кадров: комплексная программа развития авиаотрасли до 2030 года требует увеличения численности основных производственных рабочих более чем на 50 % [2].

В этих условиях молодой специалист становится ключевой фигурой. Однако именно эта категория персонала демонстрирует наиболее высокую текучесть в первые 1–2 года работы. Затраты на замену квалифицированного сотрудника могут достигать 100 % его годового оклада [7].

Исследования фиксируют, что поколения Y, Z и Альфа имеют иные ценностные установки, чем их предшественники. Для них важны не только заработная плата, но и гибкий график, современные цифровые инструменты, прозрачная система карьерного роста. В связи с этим появляется понятие дисфункционального удержания, которое показывает,

что универсальные программы не учитывают различия в ценностных установках разных поколений [5].

В результате, авиастроительное предприятие оказывается в сложной ситуации. Режимные ограничения оборонного производства делают невозможным удалённую работу для большинства позиций. Именно они становятся барьером для привлечения и удержания молодёжи.

Поэтому Казанский авиационный завод начал работать с молодежью еще в самом начале их пути. Для студентов, которые только окончили институт, у которых еще нет опыта, предусмотрено наставничество с материальным поощрением наставника.

Однако анализ выявляет системное противоречие. Ведущие инженеры, выступающие наставниками, перегружены основными производственными задачами. Их временной ресурс на передачу неявных знаний ограничен. Как показывает практика, наставничество на авиастроительных предприятиях должно быть формализовано и подкреплено материальным стимулированием, а сами наставники нуждаются в педагогической подготовке [4].

Помимо наставничества, важно выстроить и сам процесс обучения. Для разных категорий ИТР используются различные форматы. Программисты получают доступ к обучающим видеурокам, конструкторы – методические пособия, технологов отправляют в ведущие отделы. Ключевые программы включают освоение систем автоматизированного проектирования (NX, Teamcenter, T-Flex). При этом профессиональное развитие должно быть встроено в систему вертикальной и горизонтальной мобильности сотрудника [3].

Профессиональное развитие персонала является непрерывным процессом на протяжении всей трудовой деятельности [9]. Оно ориентировано на решение новых и более сложных задач, принося пользу и организации, и сотруднику [10]. Для молодого специалиста критически важно, чтобы каждый завершённый этап обучения вёл к изменению статуса.

Особое внимание следует уделить к довузовской подготовке. Наиболее перспективным направлением является совместная работа завода с КНИТУ-КАИ. Проект «Крылья Ростеха» позволяет студентам трудоустроиться с первого курса, получать повышенную стипендию, освоить рабочую профессию [8]. Базовая кафедра «Самолётостроение» ведёт подготовку на реальном практическом материале. В 2025 году для студентов Передовой инженерной школы организовано образовательное пространство на борту самолёта Ту-214.

Этот формат решает ключевую проблему, зафиксированную в опросах: 50% респондентов ВЦИОМ указывают на недостаток современного оборудования в вузах [1]. Когда студент ещё до выпуска

погружается в реальную производственную среду, адаптационный период после трудоустройства сокращается в разы.

На основе проведённого анализа можно выделить три основных ограничения в работе с молодыми специалистами.

1. Временной дефицит наставников при отсутствии механизмов их разгрузки. Решением может стать введение для наставников на период обучения новичка сокращённой основной нагрузки с сохранением оплаты [4].

2. Разрыв между ожидаемым молодыми специалистами форматом работы и реальностью оборонного предприятия. Этот разрыв невозможно устранить полностью, но его можно сгладить через прозрачную коммуникацию карьерных треков и вовлечение молодёжи в улучшение внутренних процессов [5].

3. Отсутствие жёсткой привязки обучения к статусным изменениям. Если после курсов повышения квалификации у сотрудника не растёт ни зарплата, ни должность, мотивация к обучению падает [3]. Для молодых специалистов критически важно, чтобы каждый завершённый образовательный модуль приближал их к повышению разряда, категории или включению в кадровый резерв [6].

Таким образом, без трансформации системы работы с молодыми кадрами предприятия рискуют столкнуться с тем, что инвестиции в адаптацию будут работать на конкурентов [7]. При этом полный отказ от режимных требований оборонного производства невозможен. Значит, нужно искать компромисс: сохраняя требуемый уровень безопасности и дисциплины, внедрять те цифровые и организационные решения, которые делают работу молодого инженера осмысленной и привлекательной.

Список литературы

1. ВЦИОМ. Инженеры России: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Форма доступа: <https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/inzhenery-rossii-vchera-segodnja-zavtra> (дата обращения: 30.04.2026)

2. Распоряжение Правительства РФ от 25.06.2022 № 1693-р «Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года». – 2022. – Форма доступа: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-25062022-n-1693-r/kompleksnaia-programma-razvitiia-aviatsionnoi-otrasli/?ysclid=mnxhqc2ob183494738> (дата обращения 30.04.2026).

3. Воронина, А.В. Управление развитием персонала [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / А.В. Воронина, А.Н. Кузьминов, Ю.А. Кузьмина. - Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2022. – Форма доступа: https://rgups.ru/site/assets/files/148819/1650607411_ump_upravlenie_razvitiem_personala-1.pdf (дата обращения 30.04.2026)

4. Баянов Д.И. Технология развития готовности наставников к социально-педагогическим рискам в процессе внутрикорпоративного обучения стажеров авиастроительной отрасли // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2023. – № 4. – С. 63–76.

5. Дуракова И.Б., Марцевой А.А. Дисфункциональное удержание персонала в фокусе концепции New Work // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2025. – № 1.

6. Баранова, Ю.К. Формирование индивидуального плана развития сотрудника как технология управления профессиональным развитием персонала организации [Электронный ресурс] // Экономика, управление, общество: история и современность. Материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции. Хабаровск. – 2024. – Форма доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74494504> (дата обращения 30.04.2026)

7. Марков А. Как снизить текучку персонала и удержать ценные кадры // РБК Компании. – 2025. – Форма доступа: <https://companies.rbc.ru/news/Cldn3o9FkY/kak-snizit-tekuchku-personala-i-uderzhat-tsennyye-kadryi/?ysclid=molpvkg2cl743811122> (дата обращения 30.04.2026)

8. Крылья Ростеха. – 2025. – Форма доступа: <https://rostecwings.ru/?ysclid=molpxufyek530964065> (дата обращения 30.04.2026)

9. Полевая, М.В. Технологии обучения и развития персонала в организации [Электронный ресурс]: учебник / М.В. Полевая, И.Н. Белогруд, И.А. Иванова – М.: ИНФРА-М, 2024. – 273 с. Форма доступа: <https://znanium.ru/catalog/product/2079945> ((дата обращения 30.04.2026)

10. Гребенникова, М.А. О подходах к разработке и реализации профессионального развития персонала на основе стратегического подхода / М.А. Гребенникова, М.А. Меньшикова. [Электронный ресурс] // Социально-экономические проблемы обеспечения устойчивости российской экономики – 2025. – Форма доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88818758> (дата обращения 30.04.2026)

УДК 351.814.24:347.822.4

ВИННИКОВ А.Ю.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ НАРУШЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ УПРАЖНЕНИЯ НА ДИСПЕТЧЕРСКОМ ТРЕНАЖЕРЕ

***Аннотация.** В статье предложен и обоснован дифференцированный подход к автоматической оценке практических навыков диспетчера управления воздушным движением на диспетчерском тренажере при решении им потенциально-конфликтных ситуаций для проверочных и тренировочных упражнений.*

***Ключевые слова:** воздушное судно (ВС), управление воздушным движением (УВД), конфликтная ситуация (КС), потенциально-конфликтная ситуация (ПКС), интервал эшелонирования, опасность сближения, опасность нарушения интервалов.*

Предотвращение столкновений ВС в воздухе является основополагающей задачей системы обслуживания воздушного движения,

гарантировать которую призвана стратегическая подзадача по обеспечению минимальных расстояний между ВС не менее установленных норм эшелонирования [1]. Если столкновение ВС в воздухе является авиационным происшествием и предполагает уголовную ответственность [2], то нарушение минимальных интервалов эшелонирования относится к авиационным инцидентам, и, если это нарушение произошло не по независящим от действий диспетчера УВД причинам (ошибка пилота при выдерживании высоты, технические проблемы на борту ВС, и т.п.), то считается признаком недостаточной, или порой просто низкой, компетенции данного диспетчера, и, следовательно, может служить основанием для лишения его лицензии на право осуществления деятельности по непосредственному УВД (свидетельства диспетчера УВД).

В связи с этим, при оценке практических навыков диспетчера УВД своевременно анализировать воздушную обстановку, и путем предпринятой корректировки полета одного или нескольких ВС, необходимо скорее учитывать не просто умения предотвращать столкновение ВС в воздухе, а умение предотвращать возникновение «конфликтных ситуаций», под которыми понимается нарушение интервалов эшелонирования.

Именно интервал эшелонирования является границей, которая указывает не только на потенциальную опасность столкновения ВС, но и на потенциальную опасность возможного критического для профессии диспетчера УВД нарушения правил безопасности полетов. Поэтому интервал эшелонирования и умение его не нарушать является фундаментом как для выработки необходимых профессиональных навыков, так и оценки этих навыков при подтверждении требуемого для профессии уровня компетенции.

Диспетчерский тренажер, как средство имитации рабочего места, используется не только как инструмент приобретения необходимых навыков обслуживания воздушного движения, но также как средство контроля их освоения, т.е. является инструментом оценки практических навыков диспетчера УВД. Главным звеном оценивания работы диспетчера являются надлежащим образом подготовленные и аттестованные диспетчеры-инструкторы тренажера, именно ими выставляется оценка. Можно существенно повысить эффективность диспетчерского тренажера, если создать возможности для персонального обучения диспетчера, без участия оператора или диспетчера инструктора, если создать эффективную систему автоматизированной оценки выполнения заданий.

В работах [3, 4] приведены результаты экспертных опросов действующих диспетчеров УВД, которые показывает восприятие опасности ситуации сближения ВС в зависимости от минимального допущенного расстояния между ними.

Нормы эшелонирования разработаны с целью гарантированного обеспечения не столкновения ВС в воздухе с учетом как характеристик ВС, так и возможностей средств наблюдения. Тем не менее, специалисты УВД оценивают, как содержащие в себе опасность ситуации, когда минимальные расстояния между ВС хоть и были выше нормы эшелонирования, но несли потенциальную возможность их нарушения. Причем, такую особенность оценивания имеет только горизонтальное эшелонирование. Это связано с допускаемыми законодательством отклонениями при выдерживании высот полета [5], которые, в свою очередь, определяют более низкие, по сравнению с нормами вертикального эшелонирования, критерии фиксации допущенных нарушений. Поэтому наличие вертикального расстояния между ВС равного установленной норме эшелонирования оценивается диспетчерами УВД как полностью обеспечивающим безопасность. Подобных погрешностей выдерживания расстояний, влияющих на параметры фиксации нарушения горизонтального эшелонирования, нет. И поскольку каждый диспетчер знает, что в случае фиксации нарушения нормы эшелонирования будет проведено расследование данного события, которое будет классифицировано как авиационный инцидент, в котором его признают «виновным», он будет воспринимать как опасную ситуацию, в которой существует риск подобной фиксации, даже если фактически нарушения не произойдет. Причем такое восприятие характерно и для руководителей полетов, оценивающих качество работы смены непосредственно в процессе работы, и для диспетчеров инструкторов тренажера, оценивающих действия диспетчера при выполнении тренажерного упражнения.

В работе [6] предложена методика автоматической оценки опасности сближения воздушных судов при нарушении интервалов эшелонирования, позволяющая автоматически поставить оценку действиям диспетчера по итогам развития единичной конфликтной ситуации.

Оценка опасности сближения ВС (CH – *CollisionHazard*) здесь основана на применении нормированной системы отсчета [7], благодаря которой фактическое минимальное расстояние между ВС выражается степенью допущенного нарушения интервала, и рассчитывается по формуле:

$$CH_{i,j}^t = \left(1 - \sqrt{\frac{Rxy_{i,j}^t - N^2 + dh_{i,j}^t - N^2}{2}} \right) * 100$$

Чем ближе ВС находились друг к другу, тем больше опасность сближения ВС, тем выше риски для безопасности полетов, тем, в итоге, ниже будет оценка диспетчера.

$$E_{i,j} = 100 - CH_{i,j}$$

Для целей оценки действий диспетчера при решении им ПКС данную методику можно усовершенствовать, дополнив ее оценкой опасности (риска) нарушения интервалов эшелонирования. Суть разрешения ПКС сводится к предотвращению возникновения КС. Тем не менее, результат предпринятых диспетчером действий может быть оценен как содержащий в себе большие или меньшие риски возникновения КС или нарушения интервалов эшелонирования. Необходимо определить границы для данного оцениваемого параметра.

Приведенный ранее результат опроса специалистов УВД показал, что наличие минимального расстояния между ВС равного двум нормам горизонтального эшелонирования считается всеми опрошенными гарантировано безопасным. Вмешательство в ход полета ВС, между которыми диспетчером прогнозируется наличие двойного в сравнении с нормой эшелонирования интервала, представляется нецелесообразным, поэтому это значение может быть принято за нулевое значение шкалы опасности сближения ВС при ПКС.

Таким образом, расчет опасность нарушения интервала (VH – *ValuationHazard*) может быть рассчитана по следующей формуле:

$$VH_{i,j}^t = \left(1 - \sqrt{\frac{(Rxy_{i,j}^t - N - 1)^2 + dh_{i,j}^t N^2}{2}} \right) * 100$$

Кроме предотвращения столкновений, еще одной из задач обслуживания воздушного движения является ускорение потоков, и применение на тренажере критериев, позволяющих оценивать данный параметр будет также целесообразным. С целью минимизации задержек в движении ВС вполне естественно при выполнении тренажерных упражнений стремится как можно меньше отклонять ВС от плановых траекторий, и, как следствие, применять как можно меньшие интервалы при разведении конфликтующих ВС.

Возникает очевидное противоречие. Диспетчер должен стремиться гарантированно не нарушить нормы эшелонирования, что подталкивает его к гораздо большим отклонениям ВС от их исходных траекторий полета в целях обеспечения «эшелонирования с запасом», что в свою очередь, будет приводить к увеличению задержек прибытия данных ВС в пункты назначения. А стремление к минимизации задержек предполагает исключение вмешательства в план полета, что будет вести к рискам нарушения интервалов эшелонирования.

Поскольку виновным в реальном авиационном инциденте при выполнении упражнения на тренажере диспетчер не станет, то во время тренировки, для выработки навыка минимизации задержек, можно пойти на существенно больший риск, чем при выполнении оценочного упражнения, где имеется риск быть оцененным ниже квалификационных

требований. Следовательно, целесообразным будет разработать разную систему оценивания для тренировочных и проверочных упражнений.

$$E_{i,j} = VH_{i,j} - \text{для тренировочного упражнения}$$

$$E_{i,j} = 100 - VH_{i,j} - \text{для проверочного упражнения}$$

При этом максимальное значение опасности (риска) нарушения интервала для тренировочного упражнения будет повышать оценку диспетчера, а для проверочного понижать.

Заключение

Оценка точности выполнения авиационным персоналом норм авиационного законодательства является фундаментом практики проведения анализа авиационных событий. Это определяет нацеленность диспетчеров УВД к стремлению недопущения нарушения интервалов горизонтального эшелонирования с обеспечением гарантированного запаса расстояния между конфликтующими ВС, что тем самым минимизирует риск оказаться виновником в авиационном инциденте.

Для повышения профессионального уровня диспетчерского состава предлагается диаметрально противоположный подход к оценке показываемых ими практических навыков анализа и решения потенциально-конфликтных ситуаций при выполнении тренировочных и проверочных упражнений на диспетчерском тренажере с помощью автоматизированной количественной системы. При тренировке стимулировать более высокой оценкой разведение ВС с минимальными допустимыми интервалами, но, как следствие, высоким риском нарушения норм эшелонирования. При выполнении проверочных упражнений оценивать умение гарантированно обеспечивать соблюдение установленных законодательством норм эшелонирования, снижая оценку за высокий риск их нарушения.

Наличие автоматизированной оценки показанных диспетчерами навыков при решении конфликтных ситуаций и потенциально-конфликтных ситуаций в совокупности с предлагаемым подходом к оценке выполнений упражнений на диспетчерском тренажере, путем снижения у этих диспетчеров уровня воспринимаемой опасности данных ситуаций, позволит снизить как время задержек рейсов, так и риски нарушения интервалов эшелонирования.

Список литературы

1. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 11.03.10 № 138. – М.: ГСГА, 2010.
2. Постановление Правительства РФ от 18.06.1998 № 609 (ред. от 07.12.2011) «Об утверждении Правил расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации» ПРАПИ-98 (в действ. ред.).

3. Плясовских, А. П. Закон воспринимаемой опасности авиационных событий на примере управления воздушным движением / А. П. Плясовских, Ю. Ю. Михальчевский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2024. – № 2(43). – С. 40-56.

4. Плясовских, А. П. Подтверждение закона воспринимаемой опасности авиационных событий / А. П. Плясовских, Ю. Ю. Михальчевский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2024. – № 3(54). – С. 56-69.

5. Приказ Минтранса РФ от 25 Ноября 2011 г. N 293 "Об утверждении Федеральных авиационных правил "Организация воздушного движения в Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 30.12.2011 N 22874)

6. Плясовских, А. П. Винников А. Ю., Топилин В. Ю. Методика автоматической оценки опасности сближения воздушных судов при нарушении интервалов эшелонирования // CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык. – 2024. – № 4. – С. 18-33.

7. Плясовских А. П. Критерий опасности столкновения воздушных судов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 4 (29). С. 64-74.

УДК 378.147.88: 629.7

ГАКАЕВ А.Ж., КУЗНЕЦОВА Ю.Д.

Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная корпорация», г. Москва, Россия

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ ПРАКТИКА ПАО «ОАК» КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

***Аннотация.** В статье рассматривается механизм межрегиональной практики публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация» (ОАК) в контексте пилотного проекта по трансформации системы высшего образования в России. Анализируется переход к практико-ориентированному подходу, направленному на подготовку «комплексных инженеров». Особое внимание уделяется необходимости междисциплинарного взаимодействия между конструкторскими и технологическими подразделениями, а также реализации обучения через работу над реальными индустриальными проектами на протяжении всего жизненного цикла изделия.*

***Ключевые слова:** практическая подготовка, обучение, высшее образование, комплексный инженер.*

Высшее образование в Российской Федерации находится на этапе развития, который характеризуется глубокой трансформацией. На текущий момент в соответствии с Указом Президента РФ [1] реализуется пилотный проект по формированию новой системы образования, где ключевым элементом становится практико-ориентированный подход. Министр науки

и высшего образования РФ Фальков В.Н. отметил, что именно практико-ориентированность является одним из основных принципов работы новой модели высшего образования [2]. Одной из целей данной системы является подготовка «комплексных инженеров». Для высокотехнологичных отраслей, таких как авиастроение, ключевой фигурой становится не просто выпускник с набором компетенций, а комплексный инженер, способный решать стратегические задачи в условиях неопределенности и отвечать на актуальные вызовы авиастроительной отрасли. В центре этих изменений – переход от простой передачи теоретических знаний к формированию прикладного опыта.

На текущий момент для успешной профессиональной реализации недостаточно простого набора компетенций. Будущему специалисту требуется реальный опыт работы над индустриальными проектами. Однако эффективная подготовка требует преодоления междисциплинарного разрыва: конструктор обязан понимать технологию производства, а технолог – иметь четкое представление о конструкторской деятельности. Для решения этих задач ОАК предложила и реализовала новый механизм – межрегиональную практику. Этот формат позволяет студентам из различных регионов России интегрироваться в реальные производственные и конструкторские процессы ведущих авиационных предприятий, входящих в корпорацию.

Данная модель практической подготовки имеет ряд преимуществ, одним из которых является практическая обработка навыков. Студенты в рамках практики работают не только с учебными материалами, но и, используя реальные данные и профильное программное обеспечение, решают актуальные производственные задачи и изучают все этапы жизненного цикла изделия – от концептуальной идеи и проектирования до серийного производства и сервисного обслуживания. В ходе практики будущие конструкторы и технологи работают в команде – это не только сокращает время реагирования на доработки, но и заметно качество выпускаемой конструкторской и технологической документации, а также способствует развитию навыков эффективного взаимодействия в профессиональной среде. Данный подход ориентирован на формирование системного инженера, способного решать реальные задачи в условиях междисциплинарности и высокой сложности.

Ключевым элементом, обеспечивающим эффективность программы, является создание заданий, разработанных профильными кафедрами вузов совместно с предприятиями ОАК, которые направлены на решение актуальных для авиастроительной отрасли задач. В результате прохождения практики студент не только овладевает практическими навыками, но и получает возможность существенно улучшить свои дипломные или курсовые работы за счет реальных данных и проектов. Такой подход способствует не только закреплению теоретических знаний,

но и развитию прикладных компетенций, востребованных в трудовой деятельности.

Реализация программы опирается на широкую сеть вузов-партнеров (таких как МАИ, КНИТУ-КАИ, УлГТУ, НГТУ (НЭТИ) и другие опорные университеты), которые обеспечивают теоретическую базу. Организационная схема включает в себя мобильность студентов между конструкторскими бюро и серийными заводами в разных регионах. Практика реализуется в течение 3-4 недель и состоит из двух основных блоков: знакомство с деятельностью опорного вуза и практическая деятельность на предприятии. Это позволяет учащимся сравнить подходы различных инженерных школ и производственных площадок. Успешный опыт пилотных групп позволил масштабировать данную модель на всю структуру корпорации, вовлекая большое число специальностей и партнеров. Реализация данного проекта является приоритетной задачей для обеспечения кадрового резерва отрасли и способствует укреплению ее технологического суверенитета, включающий в себя средства производства, материальные и интеллектуальные ресурсы, грамотная стратегия планирования и управления [3]. География реализации практики в 2026 году представлена на Рисунке 1.



Рисунок 1 – География реализации практики

Практика реализуется в летний период в соответствии с учебными планами вузов, при этом организаторы заблаговременно определяют квоту для студентов и проводят отбор на основании утвержденных критериев (наличие целевого или ученического договора с ОАК, хорошая и/или

отличная успеваемость, отзывы наставников и рекомендации кафедр). В рамках отбора проводятся: централизованное информирование, собеседования, общие встречи со студентами.

Особенность предложенной модели в том, что ее реализация не требует значительных финансовых затрат со стороны участников, в том числе на проживание студентов. Практика проходит в одинаковых для всех вузов-участников сроки, установленные учебными планами, а организатор обладает полной информацией о количестве отбывающих и прибывающих студентов в каждом регионе. Это позволяет заблаговременно подготовить жилищный фонд вуза (общежитие, профилакторий, гостиница) к размещению студентов.

Основные блоки программы представлены на Рисунке 2.



Рисунок 2 – География реализации практики

Благодаря мобильности между производственными площадками и конструкторскими бюро, учащиеся знакомятся со спецификой работы над различными типами авиационной техники, включая гражданские лайнеры, боевую, стратегическую и транспортную авиацию. Такой подход позволяет сформировать комплексное инженерное мышление и научиться видеть конечный высокотехнологичный продукт уже на ранних стадиях разработки.

Участие в таких проектах способствует развитию комплексного инженерного мышления студентов, которое позволяет им видеть будущий высокотехнологичный продукт уже на самых ранних стадиях разработки. Они учатся решать не только локальные задачи, но и осознавать роль каждого узла, агрегата в контексте всего изделия. Межрегиональный

формат позволяет студентам адаптироваться к работе в кооперации, единым отраслевым стандартам, а также дает возможность освоить лучшие практики различных авиастроительных площадок. Все это в совокупности формирует способности к профессиональной мобильности и эффективному взаимодействию внутри распределенных проектных команд, что критически важно для работы в отрасли.

Также важным результатом практики становится организация трудовой миграции студентов, не имеющих обязательств по отработке после освоения образовательной программы в вузе. В случае заинтересованности студенты могут подписать договор о целевом обучении или ученический договор во время или по итогам практики, а затем после выпуска трудоустроиться на предприятие.

Описанная модель практики обладает значительным потенциалом для тиражирования и масштабирования, в первую очередь на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК), испытывающих существенную нехватку квалифицированных кадров. Реализация данного механизма в масштабах страны (по аналогии с программой «Новые кадры ОПК», реализованной по заказу Минобрнауки России в 2014-2020 гг.) позволит повысить эффективность выполнения государственного плана подготовки кадров и обеспечить стратегические и высокотехнологические отрасли высококвалифицированными инженерными кадрами, создавая общий стандарт практико-ориентированной подготовки [4].

Благодаря межрегиональной практике ОАК формируется новая модель подготовки комплексных инженеров нового поколения. Способность координировать сложные инженерные проекты на протяжении всего жизненного цикла изделия не только определяет уровень качества образования, но и становится залогом технологического суверенитета авиастроительной отрасли.

Список литературы:

1. Указ Президента Российской Федерации от 12.05.2023 № 343 «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования» // сайт pravo.gov.ru. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202305120005>. – Дата обращения: 13.04.2026.
2. Практика студентов в авиационной отрасли: реализация и перспективы // РИА Новости / РИА Новости. – 2025. – 17 июня. URL: <https://ria.ru/20250617/praktika-2023284029.html>. – Дата обращения: 13.04.2026.
3. Резник С.В., К проблеме кадрового обеспечения национального технологического суверенитета // Вестник высшей школы. – №7. – С. 42-51
4. Владимир Гутенев: новые кадры для ОПК – залог обеспечения безопасности страны // Союз машиностроителей России. – 2016. – URL: <https://soyuzmash.ru/news/tidings/vladimir-gutenev-novye-kadry-dlya-opk-zalog-obespecheniya-bezopasnosti-strany/>. – Дата обращения: 27.04.2026.

УДК 615.8

КОСИЛИНА Н.И., ВОЛЬСКИЙ В.В., БОРИСОВА А.

Департамент здоровья и профилактики, ВНИИФК, Санкт-Петербургский университет гражданской авиации имени Главного Маршала авиации А.А.Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия

КОРПОРАТИВНЫЙ WELL-BEING: СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ГИМНАСТИКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОТРУДНИКОВ

***Аннотация.** Авиастроение традиционно относится к категории производств с повышенными требованиями к психофизиологическому состоянию персонала. Высокая цена ошибки, работа с критически сложными системами, многочасовая статическая нагрузка в позе оператора и воздействие сенсорно-обедненной или, напротив, перегруженной среды делают человеческий фактор решающим звеном в обеспечении безопасности полетов и качества продукции. Однако в современных образовательных программах для авиационных предприятий по-прежнему доминирует узкопрофессиональный подход, ориентированный на освоение технологических компетенций, в то время как обучение методам саморегуляции, производственной гимнастике и управлению утомлением остается на периферии учебных планов.*

Между тем накопленная отечественная научная база убедительно доказывает: грамотно выстроенная система физической культуры в режиме рабочего дня – от вводной гимнастики до восстановительно-профилактических комплексов – способна существенно снизить уровень профессионального утомления, травматизма и заболеваемости. В условиях острейшего дефицита квалифицированных кадров, характерного для современного авиапрома, ставка на сохранение здоровья и продление профессионального долголетия работников становится не просто социальной опцией, а стратегическим приоритетом кадровой политики. Цель настоящей работы – обосновать перспективную модель обучения специалистов авиастроительных предприятий, интегрирующую технические знания, навыки научной организации труда и методики психофизического восстановления в единую систему непрерывной профессиональной подготовки.

Проведенный нами анализ научно-методической базы (Аболина, 1979; Саноян, 1979; Косилина, 1980) позволил систематизировать формы занятий в режиме рабочего дня и адаптировать их под современные реалии работы в авиационных предприятиях.

***Ключевые слова:** Well-being на рабочем месте, профилактика утомления, синдром компьютерной шеи, физкультурная микропауза, нейрогимнастика, восстановление сотрудников.*

Модернизированная структура двигательной активности в течение рабочего дня

Система комплексного воздействия направлена не только на поддержание работоспособности, но и на профилактику «компьютерного синдрома» (CVS), эмоционального выгорания и нарушений опорно-двигательного аппарата (text neck).

1. Вводная гимнастика (Pre-Work Activation) – 7–10 минут
Цель: Синхронизация биоритмов и «включение» в рабочий контекст. Вместо типовых наклонов, современная вводная гимнастика включает в себя элементы нейрогимнастики (разноименные движения) и дыхательные практики для повышения сатурации крови кислородом перед началом интеллектуальной деятельности.

2. Физкультурная минутка (Energy Boost) – 1,5–2 минуты ежедневно

Цель: Снятие локального утомления. Рекомендуется к автоматической интеграции в корпоративное ПО в виде всплывающих "Movement Breaks":

- Локальная: 3D-гимнастика для глаз (фокусировка «близко-далеко»), изометрические напряжения мышц спины без отрыва от монитора.

- Общего воздействия: Динамические стойки у рабочего места (перекаты с пятки на носок, скручивания).

3. Физкультурная микропауза (Micro-Pause 2.0) – до 60 секунд
Новизна подхода (регуляция возбудимости нервной системы). Используются не просто физические приемы, а техники «импульсного расслабления». Это кратковременные встряхивания кистями в противовес туннельному синдрому и техника «заземления» (осознанное давление стоп на пол в течение 15 секунд) для снижения уровня кортизола [адаптация данных 15, 18, 28].

Инновационный блок: Восстановительно-профилактический комплекс (ВПК) как стандарт Well-being

Если ранее оздоровительная работа велась стихийно, то теперь ВПК трансформировался в структурированные "тихие комнаты" (Wellness Rooms) с таймингом 10–15 минут.

Современная новизна ВПК заключается в многорежимном воздействии в зависимости от целевого запроса:

1. Для нормализации психики (Anti-Stress): Сочетание изометрических упражнений с аудиовизуальной стимуляцией (просмотр динамических цветовых паттернов) вместо простого пассивного отдыха.

2. Для опорно-двигательного аппарата (Sit-Less Program): Использование малой тренажерной техники: массажных роллов МФР для снятия триггерных точек в области трапеции и поясницы [9, 19].

3. Для сердечно-сосудистой системы (Flow State): Низкоинтенсивная кардиоактивность (хождение по лестнице или использование подпольных степ-платформ в лаунж-зоне).

Практическая значимость внедрения: Предложенная иерархия занятий позволяет методисту корпоративного здоровья собрать "конструктор дня" даже в условиях удаленной работы. Цифровые метрики (данные с фитнес-браслетов сотрудников) теперь позволяют оценивать эффективность этих микровоздействий по росту валовой подвижности и снижению эпизодов тахикардии к концу смены.

Проведенный анализ позволяет заключить, что перспективы обучения кадров для авиастроительных и авиационных предприятий неразрывно связаны с переходом от «ремонтной» модели к превентивно-профилактической парадигме, заложенной в трудах по производственной физической культуре еще в 1970–1980-е годы. Как показала практика, даже самая совершенная система наставничества и переподготовки не дает устойчивого результата, если игнорировать физиологические пределы операторской деятельности и не обучать персонал навыкам активного восстановления непосредственно в ходе рабочей смены.

Список литературы

1. Аболина Л. Н. Комплексы восстановления в режиме труда // Сб. научн. тр. ЛНИИФК. – 1979. – С. 68–73.
2. Косилина Н. И. Структура форм производственной гимнастики // Теория и практика физической культуры. – 1980. – № 8.
3. Саноян Г. Г. Физическая культура в режиме труда трудящихся. – М.: Физкультура и спорт, 1979.
4. Денисова Д. А. Методические рекомендации по снижению производственного утомления. – М., 1981. (и другие источники из исходного списка).

УДК 378.048.2

ИВАНОВ А.В., РУМАКИНА А.В., РУССКИХ С.В.

Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРЕКА АСПИРАНТУРЫ В МОСКОВСКОМ АВИАЦИОННОМ ИНСТИТУТЕ В СОТРУДНИЧЕСТВЕ С ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИЕЙ «РОСТЕХ»

Аннотация. С 2025 года в Московском авиационном институте прием на программы аспирантуры ведется по двум трекам: производственному и академическому. Производственный трек аспирантуры реализуется в тесной кооперации с индустрией, его задача – подготовка кандидатов наук, как драйверов технологических изменений, способных ставить и решать актуальные задачи для устранения научных

и производственных разрывов, формирования научно-технического задела для создания техники нового поколения. Особенностью трека является назначение индустриального наставника как дополнительного научного консультанта или соруководителя, акцент на практической значимости и внедрении результатов диссертационной работы. В статье приведен опыт и перспективы реализации подобной модели.

Ключевые слова: *Московский авиационный институт, ГК «Ростех», аспирантура, производственный трек, индустрия, индустриальный наставник.*

С 2023 года Московский авиационный институт (МАИ) включён в число участников двух значимых образовательных инициатив:

- пилотного проекта по модернизации системы высшего образования (на указ Президента Российской Федерации «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования» от 12.05.2023, [1]);
- пилотного проекта производственной аспирантуры под эгидой Госкорпорации «Ростех» (в соответствии приказ Минобрнауки «О пилотном проекте по практико-ориентированной подготовке научных кадров для высокотехнологичных отраслей промышленности» от 14.03.2025, [2]).

Начиная с 2025 года, в МАИ внедрена двухтрековая система аспирантуры – академическая и производственная, разработанная в соответствии с актуальными федеральными требованиями к подготовке научно-педагогических кадров [3]. Ключевая задача программ аспирантуры – обеспечить качественную подготовку соискателей к успешной защите диссертационных работ, основанных на прикладных исследованиях. Такие исследования призваны:

- укреплять технологическое лидерство страны;
- стимулировать развитие промышленных отраслей;
- поддерживать и развивать научные и конструкторские школы.

Производственный трек аспирантуры ориентирован на подготовку научных кадров, способных стать катализаторами технологических преобразований. Выпускники этого трека должны выявлять и решать актуальные научно-производственные задачи, устранять существующие разрывы между наукой и производством, создавать научно-технический задел для разработки инновационных технических решений.

- Отличительные черты программы:
- привлечение индустриальных наставников в качестве дополнительных научных консультантов;
- фокус на практической применимости результатов исследований;

- обязательное внедрение научных разработок в производственные процессы.

Эффективность производственного трека обеспечивается тесным взаимодействием МАИ с ведущими промышленными предприятиями, в первую очередь – с организациями, входящими в структуру «Ростеха». Среди ключевых партнёров можно выделить Объединённую авиастроительную корпорацию (включая филиал «Оперативно-тактическая авиация» и компанию «Яковлев»), Объединённую двигателестроительную корпорацию (в т.ч. предприятия «Салют» и «ОДК-УМПО»), Концерн «Вертолёты России» (включая НЦВ Миль и Камов).

По поручению Правительства РФ (поручение Председателя Правительства Российской Федерации [4]) в МАИ назначены Главные конструкторы по стратегическим технологическим направлениям:

- авиастроение;
- беспилотные авиационные системы;
- авиационные двигатели и новая энергетика;
- космические системы и сервисы.

Главные конструкторы МАИ совместно с индустриальными партнёрами определяют перспективные научные тематики, утверждают и при необходимости корректируют темы диссертационных исследований аспирантов.

Каждое предприятие-партнёр назначает для своих аспирантов индустриальных наставников из числа опытных сотрудников. В обязанности наставника входит:

- обеспечение актуальности научной темы с точки зрения практического применения;
- содействие в реализации и внедрении результатов исследования;
- участие в совместных научных проектах;
- сопровождение аспиранта на всех этапах аттестации.

При наличии учёной степени наставник может выполнять функции научного консультанта или руководителя, [5]. Его кандидатура согласовывается с МАИ и утверждается проректором по научной работе.

С 2025 года в МАИ действует новый регламент поступления в аспирантуру. Для зачисления на производственный трек требуется предварительное согласование темы диссертации с работодателем аспиранта, научным руководителем и индустриальным наставником. Актуальность темы диссертации подтверждается официальным письмом от предприятия. Кафедра, принимающая аспиранта, предоставляет документы, подтверждающие квалификацию научного руководителя в соответствующей области.

В 2025 году абитуриенты проходили два этапа отбора:

- специализированный экзамен по научной дисциплине (вопросы формируются с учётом профиля кафедры).
- защиту предварительного исследовательского проекта, включающего краткую автобиографическую справку и описание профессионального опыта, информацию о научном руководителе и индустриальном наставнике, обоснование актуальности выбранной темы, предварительную формулировку целей, задач, объекта и предмета исследования.

Сроки приёмной кампании:

- подача документов: 20 июня – 25 августа (через сервис «Поступление в вуз онлайн»);
- вступительные испытания: сентябрь;
- начало обучения: 1 октября.

В рамках контрольных цифр приёма было выделено 119 мест по 29 научным специальностям. Наибольший конкурс наблюдался по направлениям:

- 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов» – 19 мест;
- 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» – 15 мест.

Общее количество зачисленных – 129 человек:

- целевой набор (сотрудники «Ростеха») – 12 человек;
- общий конкурс – 100 человек;
- обучение с полным возмещением затрат – 15 человек (6 из них выбрали производственный трек);

иностранные граждане – 2 человека.

Распределение по трекам:

- академический – 67 аспирантов;
- производственный – 62 аспиранта.

Участники производственного трека представляют более 40 предприятий, среди которых: «Ростех» – 26 человек; Роскосмос – 4 человека; Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», Концерн «Алмаз-Антей», «Росатом» – по 2 человека от каждой организации.

По итогам обсуждений с индустриальными партнёрами учебный план был существенно переработан:

- аудиторная нагрузка сокращена почти вдвое (с 392 до 192 академических часов);
- педагогическая практика заменена на научно-производственную (проводится на базе предприятия-партнёра на основании сетевого договора);
- введены факультативные дисциплины для индивидуального развития компетенций.

Трёх- и четырёхгодичная программа включает (занятия проводятся исключительно по субботам):

1. Обязательные дисциплины:

- история и философия науки (кандидатский экзамен);
- иностранный язык (кандидатский экзамен);
- методология научного творчества («Диссертация как проект»);
- профильная дисциплина по специальности (кандидатский экзамен);
- подготовка к защите диссертации.

2. Практики:

- научно-производственная практика.

3. Факультативы (примеры):

- цифровая трансформация высокотехнологичных предприятий;
- бизнес-аналитика и визуализация данных с применением ИИ;
- психология командной работы;
- критическое мышление в решении инженерных задач;
- профилактика профессионального выгорания;
- стандартизация и менеджмент качества на производстве.

Освоение программы аспирантуры, в том числе проведение научно-производственной практики, реализуется на основе сетевого договора (базовая организация – МАИ; организация-участник – партнёр МАИ). Договор определяет:

- сроки обучения;
- порядок утверждения тем и научных руководителей;
- назначение индустриального наставника;
- проведение практики на предприятии;
- распределение прав на интеллектуальную собственность;
- участие представителей предприятия в аттестациях и защите диссертаций;
- контроль успеваемости;
- процедуру итоговой аттестации.

Успешный старт производственного трека (62 из 129 поступивших выбрали это направление) подтверждает востребованность практико-ориентированного подхода. Сотрудничество с 40+ индустриальными партнёрами позволило адаптировать программу под реальные потребности промышленности. Активное участие «Ростеха» и других корпораций создаёт прочную основу для подготовки высококвалифицированных специалистов – конструкторов, технологов, испытателей и исследователей, способных решать актуальные задачи отечественной промышленности.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 12.05.2023 № 343 «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования» [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов. Дата публикации 12 мая 2023 г. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305120005> (дата обращения: 19.05.2026).
2. Приказ Минобрнауки от 14.03.2025 № 232 «О пилотном проекте по практико-ориентированной подготовке научных кадров для высокотехнологичных отраслей промышленности» [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов. Дата публикации 14 марта 2025 г. URL: ограниченный доступ (дата обращения: 19.05.2026).
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.11.2021 № 2122 «Об утверждении Положения о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)» [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов. Дата публикации 30 ноября 2021 г. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111300127> (дата обращения: 19.05.2026).
4. Поручение Председателя Правительства Российской Федерации от 27.11.2024 «Михаил Мишустин дал поручения по итогам стратегической сессии о развитии колледжей и вузов, обеспечивающих подготовку инженерных кадров и научных разработок для технологического лидерства» [Электронный ресурс] // Информационно-правовой портал «Гарант.Ру». Дата публикации 10 декабря 2024 г. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/410905072> (дата обращения: 19.05.2026).
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» [Электронный ресурс] // Правительство России. Дата публикации 24 сентября 2013 г. URL: <http://government.ru/docs/all/88745/> (дата обращения: 19.05.2026).

УДК 331.36

САГДИЕВА Г.З., НАДРЕЕВА Л.Л.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Россия

ОБУЧЕНИЕ НА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ КАК СОВРЕМЕННЫЙ ФОРМАТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА

***Аннотация.** В статье рассматривается применение цифровых двойников авиадвигателей в системе повышения квалификации персонала авиационной промышленности. Показано, что цифровые модели позволяют не только визуализировать конструкцию двигателя, но и моделировать реальные эксплуатационные процессы, включая сложные и аварийные режимы. Обосновывается, что использование цифровых двойников способствует ускорению обучения, снижению производственных ошибок и повышению устойчивости кадрового состава.*

***Ключевые слова:** цифровой двойник, авиадвигатель, обучение персонала, повышение квалификации, авиационная промышленность.*

Современное авиадвигателестроение – одна из самых сложных и наукоемких отраслей промышленности. Здесь все завязано на точности: производство и обслуживание авиационных двигателей требуют строгого соблюдения технологических регламентов и глубокого понимания процессов, происходящих внутри изделия. И, что немаловажно, человеческий фактор по-прежнему играет ключевую роль. Даже небольшое отклонение от технологии способно повлиять на ресурс двигателя или привести к дефектам. Цена ошибки здесь реально высока.

Традиционная система подготовки персонала строится на сочетании теории, практики и наставничества. На первый взгляд, схема проверенная. Но с ростом сложности изделий и одновременным дефицитом кадров она начинает давать сбои. Обучение затягивается, сильно зависит от конкретного наставника и, что важно, не покрывает весь спектр возможных ситуаций – особенно нестандартных. В итоге новые сотрудники нередко «проваливаются» на этапе адаптации. Это отражается и на производстве, и на текучести.

И вот здесь в игру входят цифровые двойники. Под ними понимается виртуальная модель объекта, которая воспроизводит его поведение на основе инженерных расчетов и эксплуатационных данных [7]. Важно, что это не просто красивая визуализация. Цифровой двойник позволяет смотреть на двигатель «в работе»: отслеживать параметры, видеть изменения и даже прогнозировать последствия различных воздействий.

Если говорить про авиадвигатели, такая модель – это уже целая система. В нее входят математические расчеты, данные испытаний, алгоритмы анализа. За счет этого можно моделировать запуск двигателя, изменение температурных режимов, распределение нагрузок, развитие дефектов. И вот тут появляется ключевой момент: многие из этих процессов в реальности просто не увидеть. А в цифровой среде – пожалуйста, все перед глазами. Парадокс, но иногда виртуальная модель дает больше понимания, чем реальный объект.

Логично, что при таком подходе меняется и само обучение. Работник больше не просто слушает и повторяет – он действует. Проверяет, ошибается, возвращается, делает снова. Взаимодействует с моделью, а не с инструкцией. Это сильно влияет на формирование профессионального мышления: человек начинает понимать, почему операция выполняется именно так, а не иначе. И это уже совсем другой уровень подготовки.

Практическое применение таких решений в России уже есть. Например, Объединённая двигателестроительная корпорация внедряет цифровые технологии при разработке и эксплуатации авиационных двигателей [2]. Создаются цифровые модели, которые позволяют оценивать состояние изделий, прогнозировать ресурс и выявлять потенциальные дефекты [3]. Более того, исследования показывают, что

такие модели используются и для анализа эксплуатационных характеристик, и для оптимизации конструкции [4], [5].

Что это дает обучению? По сути, работник сталкивается не с упрощенной «учебной» версией двигателя, а с максимально приближенной к реальности моделью. Это сокращает разрыв между теорией и практикой.

Использование цифровых двойников в обучении – это не только про знания, но и про вполне ощутимые экономические результаты. В отличие от классических подходов, цифровая среда позволяет быстрее освоить профессию и снизить количество ошибок уже на старте. А для авиадвигателестроения это критично: каждая ошибка – это затраты, иногда весьма серьезные.

На практике эффект проявляется сразу в нескольких направлениях. В первую очередь растет эффективность работы сотрудников, потому что они быстрее «входят» в профессию и допускают меньше нарушений. Если обобщить, можно выделить несколько ключевых результатов:

- сокращается период адаптации новых работников;
- уменьшается количество ошибок и производственного брака;
- снижается зависимость от наставников;
- повышается производительность труда.

Но не малый интерес вызывает кадровый эффект. О нем часто говорят меньше, чем следовало бы.

Основная проблема в промышленности – уход работников в первые 3–6 месяцев. Причины ухода работников: сложная работа, страх перед ошибками, нет уверенности в своих навыках.

Цифровой двойник эту ситуацию частично меняет. Он дает безопасную среду, где можно «набить руку» без последствий. Ошибся – разобрался – попробовал снова. В результате: снижается стресс, быстрее появляется результат и формируется уверенность в себе.

И вот здесь возникает важный эффект: технология начинает работать не только как инструмент обучения, но и как инструмент удержания персонала. Это уже другой уровень влияния.

Еще интереснее становится, когда цифровые двойники начинают работать не в одиночку. Их потенциал раскрывается при интеграции с другими технологиями – и это уже заметный тренд.

В первую очередь речь идет о следующих решениях:

1. Дополненная реальность (AR), которая выводит подсказки прямо во время работы.
2. Виртуальная реальность (VR), создающая эффект полного погружения.
3. Искусственный интеллект (AI), анализирующий действия работника и дающий рекомендации.

На практике это происходит так: сотрудник выполняет операцию на реальном оборудовании, а система через AR подсказывает

последовательность действий и сразу предупреждает об ошибках. Обучение перестает быть отдельным этапом – оно идет прямо в процессе работы. И это, по сути, меняет сам подход к подготовке кадров [6].

Однако, не все так идеально. Внедрение цифровых двойников требует серьезных вложений: нужны точные инженерные данные, специалисты, интеграция с существующими системами. Плюс есть человеческий фактор – не все сразу готовы работать с новыми технологиями. Это тоже надо учитывать.

Тем не менее, по мере развития цифровизации эти барьеры постепенно снижаются. И складывается ощущение, что вопрос уже не в том, будут ли использоваться цифровые двойники, а в том, как быстро они станут стандартом.

Таким образом, цифровые двойники авиадвигателей – это не просто технологическая новинка, а реальный инструмент повышения квалификации персонала. Они дают более глубокое понимание процессов, ускоряют обучение и помогают снизить количество ошибок. Особенно заметен эффект на этапе адаптации новых работников. Именно здесь технология позволяет сократить разрыв между теорией и практикой и быстрее сформировать уверенность в действиях.

Подводя итог, можно сказать, что в условиях дефицита кадров и усложнения технологий внедрение цифровых двойников становится одним из ключевых факторов повышения эффективности работы предприятий авиационной промышленности. И, похоже, этот тренд уже не развернуть назад.

Список литературы

1. Авиация России. Цифровые модели и двойники в авиастроении [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://aviation21.ru/cifrovye-modeli-i-dvojniki-v-aviastroenii/> (дата обращения: 28.04.2026).
2. Объединённая двигателестроительная корпорация. Цифровые и интеллектуальные технологии [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://www.uecrus.com/innovations/tsifrovye-i-intellektualnye-tekhnologii/> (дата обращения: 28.04.2026).
3. СNews. В России создан цифровой двойник авиационного двигателя [Электронный ресурс]. – Форма доступа: https://www.cnews.ru/news/top/2024-06-04_dlya_aviatsionnogo_dvigatelya (дата обращения: 30.04.2026).
4. Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ). Русский цифровой двойник авиадвигателя [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://ciam.ru/press-center/news-partners-and-cm/russkiy-tsifrovoy-dvoynik-aviadvigatelya/> (дата обращения: 29.04.2026).
5. Авиация России. Цифровой двойник ТВ7-117СТ-01: оптимизация готового изделия оцифровкой многолетнего опыта ОДК-Климов [Электронный ресурс]. – Форма доступа: <https://aviation21.ru/cifrovoj-dvoynik-tv7-117st-01-optimizaciya-gotovogo-izdeliya-ocifrovkoj-mnogoletnego-opyta-odk-klimov/> (дата обращения: 30.04.2026).
6. Афонин, П. Н. Цифровые двойники как основа разработки тренажерных систем обучения персонала на потоковых инспекционно-досмотровых комплексах

[Электронный ресурс] / П. Н. Афонин, А. А. Плахотин // БИТ. – 2022. – № 3 (23). – Форма доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-kak-osnova-razrabotki-trenazhernyh-sistem-obucheniya-personala-na-potokovyh-inspektionno-dosmotrovyyh-kompleksah> (дата обращения: 28.04.2026).

7. Царев, М. В. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования [Электронный ресурс] / М. В. Царев, Ю. С. Андреев // Приборостроение. – 2021. – № 7. – Форма доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya> (дата обращения: 28.04.2026).

УДК 796.07

СТРЕЛКОВА А. А., ВОЛКОВА Л.М.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИХ АВИАСПЕЦИАЛИСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ФИЗКУЛЬТУРНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

***Аннотация.** Статья посвящена комплексному анализу роли и трансформационного потенциала информационных технологий в системе физкультурно-оздоровительной деятельности студентов высших учебных заведений авиационного профиля подготовки. В работе рассматривается системный кризис традиционной модели университетского физического воспитания, выражающийся в низкой вовлеченности студентов, дефиците ресурсов и устаревших методах контроля. В качестве решения предлагается переход к персонализированной цифровой экосистеме здоровья, ядром которой выступает единая информационная платформа. Особое внимание уделяется сопутствующим педагогическим трансформациям, изменению роли преподавателя и новой системе оценивания, основанной на системности и динамике личного прогресса.*

***Ключевые слова:** информационные технологии, физкультурно-оздоровительная деятельность, студенты, вуз, цифровая экосистема, персонализация, искусственный интеллект*

Введение. Сегодня информационные технологии стремительно внедряются во все сферы жизни человека, что не обошло стороной и область физической культуры и спорта [3,5].

Современные методики обобщения достаточно значительных объемов показателей с использованием информационных технологий открывают совершенно новые горизонты оптимизации системы физкультурно-оздоровительной и спортивно-массовой деятельности в подготовке

высококвалифицированных кадров, способствуют реальному улучшению здоровья и эффективно направляют на ведение здорового, продуктивного образа жизни будущего авиационного специалиста [1,9].

Современный университетский кампус представляет собой уникальную экосистему, где пересекаются образовательные, социальные и личностные траектории развития студентов. В этой системе физическая культура и оздоровление традиционно занимали и занимают особое место, формируя не только физические компетенции, но и культуру здоровья на протяжении всей жизни, обеспечивают высокий уровень профессионального долголетия.

Однако сегодня, в условиях четвертой промышленной революции и тотальной цифровизации, эта сфера переживает глубокую трансформацию [2,4,6]. Студенчество, являющееся наиболее технологически вовлеченной и восприимчивой к инновациям социальной группой, с одной стороны, демонстрирует рост гиподинамии и связанных с ней рисков, с другой – предъявляет новые требования к формату и содержанию физкультурно-оздоровительной деятельности. Информационные технологии перестают быть вспомогательным инструментом, становясь интегральной средой, которая реформирует все компоненты системы: от управления и мониторинга до мотивации и персонализации [7,8]. Внедрение ИТ-решений в физкультурно-оздоровительную деятельность студентов вуза – это стратегическая необходимость, отвечающая вызовам цифровой эпохи и позволяющая превратить физическую активность в неотъемлемую, увлекательную и осознанную часть студенческой жизни, подготовить кадры для авиастроительных и авиационных предприятий.

Классическая система обязательных занятий физической культурой в вузе зачастую сталкивается с рядом системных вызовов:

- Низкая вовлеченность и мотивация: Единая программа не учитывает индивидуальный уровень подготовки, интересы и состояние здоровья студентов, порождая формальное отношение.

- Дефицит ресурсов (временных, инфраструктурных, кадровых): Переполненные группы, негибкое расписание, ограниченный доступ к спортивным объектам внеаудиторных часов.

- Отсутствие преемственности и системности: Физическая активность замыкается в рамках 2-4 академических часов в неделю, не переносясь в повседневную жизнь студента.

- Устаревшая система контроля и оценки: Акцент на нормативных показателях (бег, прыжки, подтягивания) вместо оценки индивидуального прогресса, приверженности и сформированности здоровых привычек.

Информационные технологии обладают потенциалом для преодоления этих барьеров, предлагая переход от унифицированной модели к персонализированной, цифровой экосистеме здоровья. Эта экосистема строится на сборе, анализе и интерпретации данных, что

позволяет выстраивать индивидуальные траектории, обеспечивать непрерывную обратную связь и создавать иммерсивную, игровую среду для вовлечения. Цифровизация физкультурно-оздоровительной деятельности – это не про замену живого тренера роботом, а про усиление его возможностей за счет инструментов для глубокой аналитики и персонализации, а также про расширение границ физкультурно-оздоровительного пространства далеко за пределы спортивного зала.

Внедрение информационных технологий в физкультурно-оздоровительную деятельность студентов можно структурировать по нескольким ключевым направлениям, каждое из которых решает конкретные педагогические и организационные задачи.

Центральным элементом должен стать единый университетский портал или мобильное приложение, интегрирующее все аспекты физкультурно-оздоровительной деятельности, а именно:

Индивидуальная карта студента – состояние здоровья, возможные отклонения в состоянии здоровья, физическая и функциональная подготовленность, даты тестирования и медицинского осмотра и т.д.

Открытая запись студента для дополнительных самостоятельных занятий в области физической культуры и спорта, подбор индивидуальных рекомендаций.

Цифровой контент – видео занятия, тренировочные программы, набор научно-методической литературы по разным аспектам физкультурно-оздоровительной и спортивно-массовой деятельности студента.

Рекомендации на основе информационных технологий становятся важным инструментом, позволяющим принимать оптимальные решения в подготовке кадров для авиастроительных и авиационных направлений подготовки.

Заключение. В настоящее время университетский спорт и физическая культура больше не могут оставаться в стороне от цифровой революции. Традиционная система физического воспитания сталкивается с вызовами нового времени: цифровое поколение студентов требует технологически насыщенных форматов для более высокого уровня подготовки будущего специалиста авиационного профиля.

Список литературы

1. Волкова, Л.М., Голубев, А.А., Евсеев, В.В. Самостоятельные занятия физическими упражнениями и самоконтроль студентов авиационных вузов//Санкт-Петербург, 2018. – 53 с.
2. Вольский, В.В., Емельянцева, С.Л. Социально-психологическое воздействие спорта на массовое сознание людей//Научные труды Северо-Западного института управления РАНХиГС. 2020. Т. 11. № 1 (43). С. 47-50.
3. Геревенко, Е. С., Гвоздиков, А. А. Цифровые технологии в физической культуре и спорте: современные тренды и перспективы // Вестник науки. 2025. №7 (88). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-v-fizicheskoy-kulture-i-sporte-sovremennye-trendy-i-perspektivy> (дата обращения: 02.04.2026).

4. Караван, А.В., Логинов, Ю.И., Лешева, Н.С., Вольский, В.В. Физическая культура студентов СПбГАСУ//Учебное пособие / Санкт-Петербург, 2014. – 54 с.
5. Ковалев, А.А. Педагогический контроль через IT-устройства // Теория и практика физической культуры. 2025. № 6. С. 18–20.
6. Митенкова, Л.В., Волкова, Л.М., Голубев, А.А. Влияние мониторинга физического состояния студентов на результативность учебного процесса//Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2017. Т. 12. № 1. С. 334-338.
7. Родионова, И.А., Шалупин, В.И., Карпушин, В.В. Фитнес-подготовка как фактор сохранения здоровья студенческой молодежи в системе высшего образования//Гуманитарные науки (г.Ялта). 2018. № 1 (41). С. 57-63.
8. Фабричников, В.В. Использование информационных технологий в физической культуре и спорте / В. В. Фабричников. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2024. – № 22 (521). – С. 148-150. – URL: <https://moluch.ru/archive/521/114889>. (дата обращения 03.03.2026).
9. Шалупин, В.И., Салимзянов, Р.Р., Родионова, И.А. [и др.]. Физическая культура и спорт в вузах гражданской авиации//Ульяновск, 2024.

УДК 378.4

ЛОГИНОВА И.В., ЦЫЦАРОВА Н.М.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,
Россия

КАДРОВЫЙ ДЕФИЦИТ В АВИАСТРОЕНИИ: РОЛЬ ВУЗА В ПОДГОТОВКЕ И ЗАКРЕПЛЕНИИ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

***Аннотация.** В статье анализируется проблема кадрового дефицита в авиастроительной отрасли Ульяновской области. Выявлен масштабный разрыв между потребностью предприятий (более 900 вакансий на Филиале АО «Ил» – Авиастар) и объемом подготовки профильных специалистов. Показано, что, несмотря на высокий уровень закрепления выпускников в регионе и их конкурентоспособную заработную плату, система целевого обучения работает недостаточно эффективно. Сформулированы предложения по усилению роли университета в обеспечении кадрового суверенитета авиастроительной отрасли.*

***Ключевые слова:** авиастроение, кадровый дефицит, целевое обучение, инженерное образование, практико-ориентированная подготовка, трудоустройство выпускников, Ульяновская область, закрепление кадров.*

Авиастроительная отрасль в России находится в стадии активной модернизации: переход на отечественные системы автоматизированного проектирования, внедрение аддитивных технологий, использование композитных материалов, цифровизация производства и развитие беспилотных авиационных систем предъявляют принципиально новые требования к персоналу [1].

Современная авиастроительная отрасль требует от сотрудников не только высокой квалификации, но и способности быстро адаптироваться к новым технологиям в производстве, например, автоматизация производственных процессов, использование композитных материалов, цифровизация предприятия и т.д. [2].

Ключевой тезис современного этапа развития авиастроения в Российской Федерации заключается в том, что кадровый дефицит становится главным сдерживающим фактором в условиях масштабного импортозамещения и необходимости наращивания производственных программ. В Ульяновской области, где расположен один из крупнейших авиастроительных заводов Европы – Филиал АО «Ил» – Авиастар, эта проблема стоит особенно остро.

Филиал АО «Ил» – одно из самых крупнейших предприятий по выпуску авиационной техники. Данное предприятие специализируется на производстве авиационной техники гражданского и военного назначения. Сегодня приоритетным направлением работы является разработка грузовых и военно–транспортных самолетов [3].

На основе анализа данных мониторинга трудоустройства и успешных образовательных практик определены ключевые проблемы и предложены пути решения кадрового дефицита в авиастроительной отрасли.

Анализ кадрового дефицита и текущего состояния подготовки позволяют количественно оценить глубину кадрового разрыва. Подготовка специалистов для авиастроения ведется по укрупненной группе специальностей 24.00.00. Выпуск в 2024 году составил 69 человек, доля трудоустроенных – 77,9 %, а средняя заработная плата выпускников достигла 144,5 тыс. руб., что является вторым по величине показателем после направления «Машиностроение».

Анализ регионов трудоустройства выпускников (табл. 1) позволяет сделать вывод о закрепляемости кадров. Почти три четверти выпускников (73,8 %) остаются работать в Ульяновской области. Это очень высокий показатель. Зарплата выпускников в регионе (111,5 тыс. руб.) более чем в 2,6 раза превышает среднюю по экономике области (42,6 тыс. руб.) (по данным Минтруда на 30.12.2024 г.).

Таблица 1 – Распределение выпускников по регионам трудоустройства и уровень заработной (по данным Минтруда на 30.12.2024 г.)

Регион	Доля трудоустроенных, %	СЗП выпускника, тыс. руб.
Ульяновская область	73,8	111,5
г. Москва	12,6	180,9
Самарская область	2,8	146,7
Республика Татарстан	2,3	165,6

Таким образом, вуз эффективно решает задачу удержания молодежи в регионе, но не может закрыть растущую потребность промышленности в силу ограниченной численности выпуска.

В Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ) сформирована современная система подготовки инженеров-разработчиков, интегрированная в реальное производство. Эти практики доказали свою эффективность и требуют масштабирования:

1. Базовая кафедра и проекты «Крылья Ростеха». Совместно с Филиалом АО «Ил» – Авиастар и АО «УКБП» реализуются образовательные треки «Крылья Ростеха» (направления «Программная инженерия», «Самолето- и вертолетостроение»). Студенты обучаются по индивидуальному плану с выделением дней для практической подготовки на предприятии.

УлГТУ, в лице самолетостроительного и машиностроительных факультетов, так же активно сотрудничает со школами образовательному проекту «Крылья Ростеха». Деканы и преподаватели проводят профориентационные встречи с учащимися физико-математических классов Ульяновского региона, рассказывая о возможностях этого уникального образовательного проекта.

2. Учебно-производственные комплексы (УПК). В УлГТУ созданы и функционируют УПК «Современные технологии машиностроения», УПК «Радиоэлектроника» (при инвестициях АО «УКБП» в 30 млн руб.), а с 2026 г. планируется запуск УПК «Технология композитов». Это оборудование используется не только для обучения, но и для выполнения хоздоговорных НИОКР по заказам предприятий.

3. Стратегические технологические проекты. В рамках проекта «Комплексные технологии производства средств технологического оснащения (СТО) нового поколения» разработаны и внедрены штампы из композитов (снижение массы в 8-9 раз) и рамы-спутники для поточной линии сборки панелей Ил-114-300. Эти разработки становятся темами курсовых и дипломных работ, формируя у студентов компетенции «инженера-разработчика технологий».

При этом наблюдается низкая эффективность целевого набора как инструмента кадрового обеспечения.

Среди основных причин можно выделить:

1) недостаточная информированность абитуриентов о программах целевого обучения;

2) недостаточно активная профориентационная работа предприятий.

Предложения по усилению роли университета:

1) активно использовать программу «Целевой абитуриент»;

2) распространить опыт сетевых образовательных программ (УлГТУ – Авиастар) на другие предприятия авиакластера;

3) включить в обязательный перечень курсовых и дипломных работ для инженерных направлений решение реальных производственных задач в рамках выполняемых университетом НИОКР.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие основные выводы:

1) кадровый дефицит в авиастроении Ульяновской области реален и масштабен. Только на Авиастере открыто более 900 вакансий, а выпуск авиастроителей составляет около 70 человек в год. Дефицит носит хронический характер.

2) университет эффективно решает задачу закрепления молодежи в регионе.

3) практико-ориентированные модели (базовые кафедры, проекты «Крылья Ростеха», УПК) доказали свою эффективность и должны быть масштабированы. Вовлечение студентов в реальные R&D-проекты позволяет формировать специалистов, готовых к работе на высокотехнологичном производстве.

4) целевой набор как инструмент работает слабо. Необходимо активнее информировать абитуриентов, развивать программу «Целевой абитуриент УлГТУ» и разрабатывать новые механизмы привлечения молодежи на стратегически важные предприятия.

Таким образом, вузам необходимо выстраивать более тесное взаимодействие с промышленными партнёрами, актуализировать основные образовательные программы и своевременно оценивать востребованность выпускников на рынке труда [4].

Также необходимо увеличить целевой набор на инженерные специальности, чтобы начать постепенно сокращать кадровый разрыв. Университет располагает всеми необходимыми ресурсами и успешными практиками для этого.

Только системное объединение усилий университетов, предприятий и государства позволит обеспечить кадровый суверенитет российской авиационной отрасли.

Список литературы

1. Цыцарова, Н. М. Компетентностный подход к подготовке специалистов для авиастроительной отрасли / Н.М. Цыцарова, И. В. Логинова // Перспективные направления развития авиационной отрасли в России и Ульяновской области: Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции, Ульяновск, 23-24 апреля 2026 года – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2026. – С. 5-11

2. Сачкова, А. А. Разработка рекомендаций по развитию кадрового потенциала авиастроительного предприятия / А. А. Сачкова // Экономика будущего: тренды, вызовы и возможности: материалы III Всероссийской научно-практической студенческой конференции с международным участием, Казань, 22–23 мая 2025 года. – Казань: ИП Сагеев А.Р., 2025. – С. 441-444. – EDN JZBEXG.

3. Логинова, И. В. Разработка мероприятий по обеспечению качества производства самолетов типа Ил-76 / И. В. Логинова, Е. И. Князева // Вузовская наука в

современных условиях: сборник материалов 55-й научно-технической конференции. В 3 ч., Ульяновск, 25–30 января 2021 года. Том Часть 1. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 227-230. – EDN ЕКРJAІ.

4. Логинова, И. В. Сравнительный анализ востребованности выпускников вузов в контексте первого национального рейтинга трудоустройства: методология, результаты, региональная специфика / И. В. Логинова // Финансовый бизнес. – 2026. – № 3(273). – С. 41-43. – EDN ОТРАХР.

5. Официальный сайт Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации – URL: <https://mintrud.gov.ru/docs> (дата обращения: 29.05.2026 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ЦИФРОВИЗАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И РОБОТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВИАСТРОЕНИИ	3
АЛЕШИН Б.С., ЧЕРНОМОРСКИЙ А.И., ПЕТРУХИН В.А., ЛЕЛЬКОВ К.С., ХОРЕВ Т.С., АНТОНОВ Д.А.	3
РОБОТИЗИРОВАННАЯ КОЛЕСНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ ВНУТРИ ПРЕДПРИЯТИЯ	3
ВАЛЬЦЕФЕР В. Э.	7
АЕРОGR: РЕКОНСТРУКЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПО РАЗРЕЖЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ БПЛА С ПОМОЩЬЮ ГАУССОВСКИХ ПРОЦЕССОВ И ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ	7
ВОРОБЬЕВ А.Р.	11
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППОЙ	11
У Г., СЕРЕБРЕННЫЙ В. В.	16
ВОПРОСЫ РОБОТИЗАЦИИ ОПЕРАЦИЙ СВЕРЛОВКИ И КЛЕПКИ ФЮЗЕЛЯЖЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	16
КУТЕПОВ А.П., КОШКИНА А.А., ГОРЮНОВ С.В.	22
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА МАССЫ ЛИНИЙ ВЗАИМОСВЯЗИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО СУДНА	22
ГОРЮНОВА Е.С.	25
МОБИЛЬНЫЙ СТЕНД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ СИСТЕМ САМОЛЕТА	25
ЖИТКОВ Р. В., МИХАЙЛОВ В. С., СВЯТОВ К. В.	28
ОПИСАНИЕ ПОДХОДА К ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВАТС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ UWB В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ СПУТНИКОВОГО СИГНАЛА	28
ЗАЙНУЛЛИНА Д.С., НАДРЕЕВА Л.Л.	33
ЦИФРОВИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВИАСТРОЕНИИ: ФАКТОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ	33
ИЛЬИНА О. Н.	39
ЦИФРОВИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ	39
КОЗЫРЕВА У.Р., БОРИСОВА Е.В.	45
ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СМК НА ЭТАПАХ ЖЦ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ	45
КУЛИКОВ Т.Н., ГОРЮНОВ С.В.	50
УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ РАСЧЁТЕ ПРИВОДОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИИ УСИЛИЙ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОВОДКАХ	50
МИХАЙЛОВ В.С., ЖИТКОВ Р.В., СВЯТОВ К.В.	55
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	55
МАКАРОВА М. Ю., МУСТАФИНА Г. Г.	61
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОММЕРЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	61

РЕДЖЕПОВ К.	64
ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВИАСТРОЕНИИ	64
СОКОЛ И.Н., ЛЕВШОНКОВ Н.В.	67
ОПТИМИЗАЦИЯ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЗАХВАТА КОНТЕЙНЕРА-ТЕЛЕЖКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СБОРА ОТХОДОВ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА	67
ФОКИН И.В., ГОВОРКОВ А.С.	71
АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА 3D-МОДЕЛЕЙ И ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ.....	71
ХАЙРУЛЛИН И. Д.	76
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СЕМАНТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МЕСТНОСТИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВАТС	76
БЕЛОУСОВ Д.Д.	80
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	80
МОШКИН В.С., МЫТАРИН Е.С.	85
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЁМ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЧЁТКОЙ ОНТОЛОГИИ.....	85
МОШКИН В.С., ГУРЬЯНОВ А.В.	90
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ 3D-ОБЪЕКТОВ.....	90
МОШКИН В.С., КАШИН М.И.	95
МОДЕЛЬ РЕЛЕВАНТНОСТИ ДОКУМЕНТОВ В МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ RAG-СИСТЕМЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОМОЩНИКА.....	95
МАШКОВ Н. А., ГУСЬКОВ Г. Ю.	99
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАЯВОК В ЕДИНУЮ ДИСПЕТЧЕРСКУЮ СЛУЖБУ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	99
БАШАРИН С.В., ГУСЬКОВ Г.Ю.	101
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕР-РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТА	101
СЕКЦИЯ 2. КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОСНАСТКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ В АВИАСТРОЕНИИ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ.....	104
БИЗЯЕВ Д. А.	104
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКТИВНОГО И ПРЕВЕНТИВНОГО ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	104
ЕВДОКИМОВ С.К., АБДУЛЛИН И.Н.	110
СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ САМОЛЁТА ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ.....	110
ЕВСЕВИЧЕВ Д.А., ШАРАПОВ Н.В.	114
РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОЦЕДУРНОГО ТРЕНАЖЕРА ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА	114

ИБРАГИМОВ М.Р., УСМОНОВ Р. С., БАТРАКОВ В.В.	119
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПРЕФОРМ С ТРИАКСИАЛЬНОЙ СХЕМОЙ АРМИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА.....	119
ЛАВРИНОВИЧ Р. С., МОЛОКОВА С. В., ПЕРШУКОВ В. В., ШЕВЧЕНКО Е. М.	121
ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ДРОНОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ: ОБЗОР МЕТОДОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СИСТЕМ	121
ПАРФЕНОВ Д. А., КОНСТАНТИНОВ Д. Ю.	127
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРЕССОВОГО ФОРМОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛАСТИЧНОГО ПУАНСОНА С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ	127
ПЕТРОВ И.А.....	130
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРДАННОГО ВАЛА ВЕРТОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	130
РЫЖКОВ М. Ю., ПЫХАЛОВ А. А.	133
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕМОНТНЫХ ВТУЛОК НА ПРОЧНОСТЬ И УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	133
СЕРГЕЕВ Д.С., ЧИНАХОВ Д.А.	138
СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА.....	138
ОШОРОВ А.Д., УШАКОВ И.В., БАТОМУНКУЕВ А.Ю.	142
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.....	142
ШАРАПОВ М. А., СОЛОВЬЕВ Р. И., АМИРОВА Л. М.	147
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	147
СЕКЦИЯ 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАНИКИ	151
АНТОНЕЦ И. В., НИГМАТУЛЛИНА Л. А.	151
ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ: ОТ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ДО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	151
ВАЛИТОВ Р.Р., КИСЕЛЕВ С.К.	156
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВИАЦИОННОГО ПРОЖЕКТОРА.....	156
КОЛОТИЛОВ А. А., КЛИМОВСКИЙ А. Б.	162
НЕЧЕТКОЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	162
ГАРАНЖА Е.А., ФОКИН Я.О.	167
ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	167
ГУЩИН С. В., ГЕРАСИМЕНКО Д. А., ЦВЕТКОВ Н. С.	171
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	171
ЖЕМАЕВА Д.А., ГЕВАК Н.В.	179
МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЭО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ.....	179
КИНДЕЕВ А.Д., ШИШКИН В.В.	184

АНАЛИЗ СЛОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОТОКЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ БОРТОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	184
КОМИССАРОВ А.В., УСАЛЕВА С.А.	189
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ЭТАПЕ ОСВОЕНИЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АВИАЦИОННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	189
ЧИНАХОВ Д.А., МЕЩЕРИНА Н.В.	194
НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛА И КЕРАМИКИ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ	194
НАСИБУЛИНА И.А., КИСЕЛЕВ С.К.	197
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИИ ПРОМПТОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	197
СТРУЧКОВСКИЙ Е. В., КИСЕЛЕВ С. К.	201
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНОЙ АВИАНИКИ ПРИ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВЕ И РАЗРАБОТКЕ	201
СКОРНЯКОВ Р. Ю.	204
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	204
КОМИССАРОВ А.В., ТАМЬЯРОВА М.В.	207
ОЦЕНКА МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ КВАРЦЕВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КУБЕ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ.....	207
ТЕРЕХИН В.В., ГАРАНОВИЧ Д.И., ОГУРЦОВА К.М.	213
ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ «СВЧ КИТ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В АВИАЦИОННЫХ УНИВЕРСИТЕТАХ	213
НИКОЛАЕВ С.В., ТУПИЦЫН А.П.	218
БОРТОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЯГИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПОЛЕТЕ	218
СЕКЦИЯ 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	224
ДИНЬ Н.Т., ГАЗИЗОВ Т.Р.	224
МАКСИМИЗАЦИЯ РАЗНОСТИ ПОГОННЫХ ЗАДЕРЖЕК МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПРОВОДНИКАМИ В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ.....	224
ЗУБКО А.И.	228
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ ГТД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ	228
КОЛМАГОРОВ И. Д., ПЕШКОВ Р. А.	233
ПРОБЛЕМА СХОДИМОСТИ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ К ТРИВИАЛЬНОМУ РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ.....	233
ДАВЫДЕНКОВ А. В., ТАТАРОВ Г. Л.	238
РАЗРАБОТКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА «СКАТ»	238
ЕПИФАНОВ А.В., ФРИБУС В.С., ТАТАРОВ Г.Л.	242
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БПЛА.....	242
АСТАНИН Н.Н., АФОНИН А.В, ЗАГОРДАН А.А., СОШНИКОВ А.М., ЧУХОНЦЕВ С.В.	247

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ САПР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЪЕМНОГО РОЛИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ГЕНЕРАЛЬНЫХ ГРУЗОВ НА АВИАЦИОННЫХ ПАЛЛЕТАХ В ВОЗДУШНЫХ СУДАХ ТИПА АН-124-100.....	247
ЯБЛОНСКИЙ А.Н., ПЕТРОВ П.А.	252
РАЗРАБОТКА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ/ ДОСТАВКИ/ АЭРОФОТОСЪЕМКИ.....	252
СЕКЦИЯ 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ОБУЧЕНИЯ КАДРОВ ДЛЯ АВИАСТРОИТЕЛЬНЫХ И АВИАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	258
АБДУРАХМАНОВА А.И., НАДРЕЕВА Л.Л.	258
АДАПТАЦИЯ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ В АВИАСТРОЕНИИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КАЗАНСКОГО АВИАЦИОННОГО ЗАВОДА ИМ. С.П. ГОРБУНОВА).....	258
ВИННИКОВ А.Ю.	261
ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ НАРУШЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ УПРАЖНЕНИЯ НА ДИСПЕТЧЕРСКОМ ТРЕНАЖЕРЕ	261
ГАКАЕВ А.Ж., КУЗНЕЦОВА Ю.Д.	266
МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ ПРАКТИКА ПАО «ОАК» КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	266
КОСИЛИНА Н.И., ВОЛЬСКИЙ В.В., БОРИСОВА А.	271
КОРПОРАТИВНЫЙ WELL-BEING: СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ГИМНАСТИКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОТРУДНИКОВ	271
ИВАНОВ А.В., РУМАКИНА А.В., РУССКИХ С.В.	273
РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРЕКА АСПИРАНТУРЫ В МОСКОВСКОМ АВИАЦИОННОМ ИНСТИТУТЕ В СОТРУДНИЧЕСТВЕ С ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИЕЙ «РОСТЕХ».....	273
САГДИЕВА Г.З., НАДРЕЕВА Л.Л.	278
ОБУЧЕНИЕ НА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ КАК СОВРЕМЕННЫЙ ФОРМАТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА.....	278
СТРЕЛКОВА А. А., ВОЛКОВА Л.М.	282
ПЕРСПЕКТИВЫ ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИХ АВИАСПЕЦИАЛИСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ФИЗКУЛЬТУРНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	282
ЛОГИНОВА И.В., ЦЫЦАРОВА Н.М.	285
КАДРОВЫЙ ДЕФИЦИТ В АВИАСТРОЕНИИ: РОЛЬ ВУЗА В ПОДГОТОВКЕ И ЗАКРЕПЛЕНИИ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ	285

Научное электронное издание

**«УЛЬЯНОВСКИЙ АВИАЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС –
50 ЛЕТ РАЗВИТИЯ»**

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
(Россия, г. Ульяновск, 29 мая 2026 г.)**

Тезисы докладов

Отв. за выпуск С.В. Скворцов, Т.Г. Рожина

ЛР № 020640 от 22.10.97

Дата подписания к использованию 10.09.2026.

ЭИ № 2240. Объем данных 4,4 Мб. Заказ № 324.

Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновская обл., Ульяновск, Сев. Венец, 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновская обл., Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Тел.: (8422) 778-513

e-mail: venec@ulstu.ru