ISSN 2221-5182
Импакт-фактор РИНЦ: 0,485

«НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ»

научно-практический журнал

№ 8(182) 2026

Главный редактор

Тарандо Е.Е.

Редакционная коллегия:

Воронкова Ольга Васильевна
Атабекова Анастасия Анатольевна
Омар Ларук
Левшина Виолетта Витальевна
Малинина Татьяна Борисовна
Беднаржевский Сергей Станиславович
Надточий Игорь Олегович
Снежко Вера Леонидовна
У Сунцзе
Ду Кунь
Тарандо Елена Евгеньевна
Пухаренко Юрий Владимирович
Курочкина Анна Александровна
Гузикова Людмила Александровна
Даукаев Арун Абалханович
Тютюнник Вячеслав Михайлович
Дривотин Олег Игоревич
Запивалов Николай Петрович
Пеньков Виктор Борисович
Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич
Даниловский Алексей Глебович
Иванченко Александр Андреевич
Шадрин Александр Борисович

В ЭТОМ НОМЕРЕ:

МАШИНОСТРОЕНИЕ:
– Машиноведение
– Роботы, мехатроника и робототехнические системы
– Технология машиностроения
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:
– Математическое моделирование и численные методы
– Информационная безопасность
– Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ:
– Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ:
– Математические, статистические и инструментальные методы в экономике
– Региональная и отраслевая экономика
– Финансы
– Менеджмент

Москва 2026

«НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ»

научно-практический журнал

Журнал
«Наука и бизнес: пути развития»
выходит 12 раз в год.
Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и
охране культурного наследия
(Свидетельство ПИ № ФС77-44212).
Учредитель
МОО «Фонд развития науки и
культуры»
Журнал «Наука и бизнес: пути
развития» входит в перечень ВАК
ведущих рецензируемых научных
журналов и изданий, в которых
должны быть опубликованы
основные научные результаты
диссертации на соискание ученой
степени доктора и кандидата наук.
Главный редактор
Е.Е. Тарандо
Выпускающий редактор
В.С. Солодова
Редактор иностранного
перевода
Н.А. Гунина
Инженер по компьютерному
макетированию
В.С. Солодова
Адрес редакции:
г. Москва, ул. Малая Переяславская,
д. 10, к. 26
Телефон:
89156788844
E-mail:
nauka-bisnes@mail.ru
На сайте
http://globaljournals.ru
размещена полнотекстовая
версия журнала.
Информация об опубликованных
статьях регулярно предоставляется
в систему Российского индекса
научного цитирования
(договор № 2011/30-02).
Перепечатка статей возможна только
с разрешения редакции.
Мнение редакции не всегда
совпадает с мнением авторов.

Экспертный совет журнала

Тарандо Елена Евгеньевна – д.э.н., профессор кафедры экономической социологии Санкт-Петербургского государственного университета; тел.: 8(812)274-97-06; E-mail: elena.tarando@mail.ru.

Воронкова Ольга Васильевна – д.э.н., профессор, председатель редколлегии, академик РАЕН, г. Санкт-Петербург; тел.: 8(981)972-09-93;E-mail: nauka-bisnes@mail.ru

Атабекова Анастасия Анатольевна – д.ф.н., профессор, заведующая кафедрой иностранных языков юридического факультета Российского университета дружбы народов; тел.: 8(495)434-27-12; E-mail: aaatabekova@gmail.com.

Омар Ларук – д.ф.н., доцент Национальной школы информатики и библиотек Университета Лиона; тел.: 8(912)789-00-32; E-mail: omar.larouk@enssib.fr.

Левшина Виолетта Витальевна – д.т.н., профессор кафедры управления качеством и математических методов экономики Сибирского государственного технологического университета; 8(3912)68-00-23; E-mail: violetta@sibstu.krasnoyarsk.ru.

Малинина Татьяна Борисовна – д.социол.н., профессор кафедры социального анализа и математических методов в социологии Санкт-Петербургского государственного университета; тел.: 8(921)937-58-91; E-mail: tatiana_malinina@mail.ru.

Беднаржевский Сергей Станиславович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Сургутского государственного университета, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, академик РАЕН и Международной энергетической академии; тел.: 8(3462)762-812; E-mail: sbed@mail.ru.

Надточий Игорь Олегович – д.ф.н., профессор, заведующий кафедрой философии Воронежской государственной лесотехнической академии; тел.: 8(4732)53-70-708, 8(4732)35-22-63; E-mail: inad@yandex.ru.

Снежко Вера Леонидовна – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева; тел.: 8(495)153-97-66, 8(495)153-97-57; E-mail: VL_Snejko@mail.ru.

У Сунцзе (Wu Songjie) – к.э.н., преподаватель Шаньдунского педагогического университета (г. Шаньдун, Китай); тел.: +86(130)21-69-61-01; E-mail: qdwucong@hotmail.com.

Ду Кунь (Du Kun) – к.э.н., доцент кафедры управления и развития сельского хозяйства Института кооперации Циндаоского аграрного университета (г. Циндао, Китай); тел.: 89606671587; E-mail: tambovdu@hotmail.com.

«НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ»

научно-практический журнал

Пухаренко Юрий Владимирович – д.т.н., член-корреспондент РААСН, профессор, заведующий кафедрой технологии строительных материалов и метрологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета; тел.: 89213245908; E-mail: tsik@spbgasu.ru.

Курочкина Анна Александровна – д.э.н., профессор, член-корреспондент Международной академии наук Высшей школы, заведующая кафедрой экономики предприятия природопользования и учетных систем Российского государственного гидрометеорологического университета; тел.: 89219500847; E-mail: kurochkinaanna@yandex.ru.

Морозова Марина Александровна – д.э.н., профессор, директор Центра цифровой экономики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург; тел.: 89119555225; E-mail: marina@russiatourism.pro.

Гузикова Людмила Александровна – д.э.н., профессор Высшей школы государственного и финансового управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург; тел.: 8(911)814-24-77; E-mail: guzikova@mail.ru.

Даукаев Арун Абалханович – д.г.-м.н., заведующий лабораторией геологии и минерального сырья Комплексного научно-исследовательского института имени Х.И. Ибрагимова РАН, профессор кафедры физической географии и ландшафтоведения Чеченского государственного университета, г. Грозный (Чеченская Республика); тел.: 89287828940; E-mail: daykaev@mail.ru.

Тютюнник Вячеслав Михайлович – к.х.н., д.т.н., профессор, директор Тамбовского филиала Московского государственного университета культуры и искусств, президент Международного Информационного Нобелевского Центра, академик РАЕН; тел.: 8(4752)50-46-00; E-mail: vmt@tmb.ru.

Дривотин Олег Игоревич – д.ф.-м.н., профессор кафедры теории систем управления электрофизической аппаратурой Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург; тел.: (812)428-47-29; E-mail: drivotin@yandex.ru.

Запивалов Николай Петрович – д.г.-м.н., профессор, академик РАЕН, заслуженный геолог СССР, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск; тел.: +7(383)333-28-95; E-mail: ZapivalovNP@ipgg.sbras.ru.

Пеньков Виктор Борисович – д.ф.-м.н., профессор кафедры математических методов в экономике Липецкого государственного педагогического университета, г. Липецк; тел.: 89202403619; E-mail: vbpenkov@mail.ru.

Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич – д.ф.-м.н., профессор, ректор Костанайского социально-технического университета имени академика Зулкарнай Алдамжар, г. Костанай (Республика Казахстан); E-mail: pkkstu@mail.ru.

Даниловский Алексей Глебович – д.т.н., профессор кафедры судовых энергетических установок, систем и оборудования Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, г. Санкт-Петербург; тел.: (812)714-29-49; E-mail: agdanilovskij@mail.ru.

Иванченко Александр Андреевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; тел.: (812)321-37-34; E-mail: IvanchenkoAA@gumrf.ru.

Шадрин Александр Борисович – д.т.н., профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; тел.: 321-37-34; E-mail: abshadrin@yandex.ru.

Содержание

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Математическое моделирование и численные методы

Войтенко Т.Ю., Кирилловский Е.А., Фирер А.В. Создание интерактивного чат-бота с элементами теории решения изобретательских задач 10

Галова М.К., Коротков К.С., Голан А.В., Степанова Т.А. Разработка программно-аппаратного комплекса слежения за насекомыми и определения путей их миграции с возможностью контроля популяции 15

Извеков Ю.А., Светус К.О., Крайняя В.О., Валеева К.Д. Применение физически-информированных нейронных сетей для управления воздушным потоком в трубопроводах со сложной геометрией 19

Казаков Н.К., Ивлиев Н.А. Влияние преобразований входных данных и выбора нейросетевой модели на точность определения координаты светового пятна квадрантного фотодетектора..... 23

Костиневич А.В., Костиневич В.В. Применение алгоритма случайного леса для прогнозирования производственного травматизма на промышленных предприятиях 30

Костиневич А.В., Костиневич В.В. Сравнение и анализ алгоритмов для построения максимальных паросочетаний в невзвешенном двудольном графе 34

Медведев А.П. Моделирование результативности мер противодействия компьютерным атакам на основе вложенных кусочно-линейных регрессий..... 39

Островский В.В., Доррер М.Г. Выбор инструмента для локального запуска языковых моделей: сравнительный анализ Ollama и vLLM..... 47

Савинов А.А., Солодов А.Г. Определение минимально достаточной конфигурации вычислительных средств для имплементации нейросетевых алгоритмов управления в устройствах с жесткими ограничениями по энергопотреблению и габаритам 51

Торшина О.А., Светус К.О., Горбатов В.И., Мустафин А.Ф. Математическое моделирование аэродинамических характеристик 56

Информационная безопасность

Каримов С.Б., Воронкова О.В. Проектирование под траекторию изменения требования вместо его текущей формулировки..... 61

Мансуров А.В., Минакова Н.Н., Журавлева В.В., Лепендин А.А., Варанкин А.П. Нейросетевой гибридный подход к идентификации сетевого трафика защищенных VPN-протоколов..... 70

Сидорович М.А., Приходько С.А., Попов М.А., Пономарчук Ю.В. О защите канала управления систем распределенной тяги от несанкционированного доступа 79

Шипулин С.С., Беззатеев С.В. Децентрализованная система обнаружения вторжений на

основе федеративного обучения и блокчейн-валидации 86

Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий

Глумова Е.С, Филинских А.Д. Оценка семантической согласованности иерархического разбиения облака точек 90

Орехов А.В. Параметризация геометрических факторов FDM-экструзии в системе APM FEM при моделировании напряженно-деформированного состояния полимеров при осевом растяжении 99

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Машиноведение

Борисов С.В., Никишина Ю.Г. Гибридный цифровой двойник подшипника скольжения для оценки технического состояния по вибрационным и температурным данным..... 106

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Зарукин А.А., Зинченко Д.А., Белянкин В.А., Третьяков Д.А. Адаптивная система согласованного управления подачей трехосевого обрабатывающего центра с компоновкой X–Z–C 112

Зарукин А.А., Зинченко Д.А., Третьяков Д.А. Моделирование динамики гибридного манипулятора с двухкоординатным ременным приводом с синфазно-противофазным управлением и двухосевым наклонным узлом.....118

Зарукин А.А., Зинченко Д.А., Третьяков Д.А. Трехосевой фрезерный обрабатывающий центр для изготовления позитивов культеприемных гильз при протезировании нижних конечностей..... 124

Зарукин А.А., Зинченко Д.А., Третьяков Д.А., Борышнев А.М. Разработка модели и системы управления БПЛА в среде MATLAB Simulink 129

Зырянов Д.А., Соленый С.В. Алгоритм RSR для 8-ми связных пространств: модификация и оценка эффективности при построении маршрутов..... 137

Технология машиностроения

Воробьев А.С., Любомудров С.А. Оценка эффективности технической подготовки производства новых изделий в условиях опытного и мелкосерийного производства..... 145

Лимочко И.Ю., Соловьев И.И., Трифанов И.В. Совершенствование технологической подготовки производства изделий ракетно-космического назначения на предприятиях Красноярского края..... 151

Хрусталева И.Н., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Степанов С.С. Модель оптимизации параметров технологического процесса механической обработки изделия 160

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Мальцев С.Е., Романов А.А. Интегрированный механизм приоритизации и использования резервов производственной мощности 167

Масленникова Ю.Л. Управление внеплановыми заказами на опытном производстве 172

Николаева А.Г., Цветков А.С., Кондратьева В.М. Развитие системы контроля качества труб для транспортировки водородного топлива 177

Софронов А.А., Булатов В.В. Анализ современного программного обеспечения для анализа надежности технических систем 182

Туманов А.Ю., Иванов Е.В. Эволюция систем качества и методов моделирования в концепции Индустрии (2.0–6.0) наукоемкого производства 190

Ляпунцова Е.В., Чечнев В.Б. Адаптивный инструмент формирования и выбора альтернативных планов работ на мелкосерийном производстве 194

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

Щекотова К.С., Ростова Е.П. Разработка теоретико-игровой модели внедрения программного обеспечения в условиях институционального сопротивления 199

Ярцев Д.Д. Нечеткий природоподобный метод распределения бюджета между каналами привлечения соискателей 205

Региональная и отраслевая экономика

Горшкова Л.В. Анализ обеспеченности медицинской помощью населения России: региональный аспект 210

Кузнецова Т.И. Промышленные маркетплейсы как драйверы цифровой трансформации производственной системы предприятия в условиях кризиса 215

Финансы

Бельских И.Е., Маркелов К.В. Облигационные стратегии финансирования инноваций на различных этапах жизненного цикла компаний на внутреннем рынке 219

Менеджмент

Арончиков А.А., Кудрявцева А.В. Организационные аспекты корпоративного обучения в инновационной компании 223

Contents

INFORMATION TECHNOLOGY

Mathematical Modeling and Numerical Methods

Voitenko T.Yu., Kirillovsky E.A., Firer A.V. Creating an Interactive Chatbot with Elements of the Theory of Inventive Problem Solving 10

Galova M.K., Korotkov K.S., Golan A.V., Stepanova T.A. Development of the Integrated System for Insect Tracking and Migration Path Determination with Population Control Capability 15

Izvekov Yu.A., Svetus K.O., Krainaya V.O., Valeeva K.D. Application of Physically Informed Neural Networks to Air Flow Control in Pipelines with Complex Geometry 19

Kazakov N.K., Ivliev N.A. The Influence of Input Data Transformations and Neural Network Model Selection on the Accuracy of Light Spot Coordinate Estimation for a Quadrant Photodetector 23

Kostinevich A.V., Kostinevich V.V. Application of the Random Forest Algorithm for Predicting Occupational Injuries at Industrial Enterprises 30

Kostinevich A.V., Kostinevich V.V. Comparison and Analysis of Algorithms for Constructing Maximal Matches in an Unweighted Bipartite Graph 34

Medvedev A.P. Modeling the Effectiveness of Measures to Countercomputer Attacks Based on Nested Piecewise Linear Regressions 39

Ostrovsky V.V., Dorrer M.G. Choosing a Tool for Running Local Language Models: A Comparative Analysis of Ollama and vLLM 47

Savinov A.A., Solodov A.G. Determination of a Minimally Sufficient Computing Configuration for Neural Network Control Algorithms in Power- and Size-Constrained Devices 51

Torshina O.A., Svetus K.O., Gorbatov V.I., Mustafin A.F. Mathematical Modeling of Aerodynamic Characteristics 56

Information Security

Karimov S.B., Voronkova O.V. Designing for the Trajectory of a Requirement Change Instead of Its Current Formulation 61

Mansurov A.V., Minakova N.N., Zhuravleva V.V., Lependin A.A., Varankin A.P. A Hybrid Neural Network Approach to Identifying Secure VPN Network Traffic 70

Sidorovich M.A., Prikhodko S.A., Popov M.A., Ponomarchuk Yu.V. On Control Channel Protection for Distributed Traction Systems from Unauthorized Access 79

Shipulin S.S., Bezzateev S.V. A Decentralized Intrusion Detection System Based on Federated Learning and Blockchain Validation 86

Engineering Geometry and Computer Graphics. Digital Product Lifecycle Support

Glumova E.S., Filinskikh A.D. Evaluation of the Semantic Consistency of Hierarchical Point Cloud Partitioning 90

Orekhov A.V. Parametrization of Geometric Factors of FDM Extrusion in the APM FEM System during Modeling of the Stress-Strain State of Polymers under Axial Tension..... 99

MECHANICAL ENGINEERING

Mechanical Engineering

Borisov S.V., Nikishina Yu.G. A Hybrid Digital Twin of a Slide Ball Bearing for Assessing Technical Condition Based on Vibration and Temperature Data..... 106

Robots, Mechatronics and Robotic Systems

Zarukin A.A., Zinchenko D.A., Belyankin V.A., Tretyakov D.A. Adaptive Coordinated Feed Control System for a Three-Axis Machining Center with an X–Z–C Configuration 112

Zarukin A.A., Zinchenko D.A., Tretyakov D.A. Dynamic Modeling of a Hybrid Manipulator with a Two-Axis Belt Drive Under In-phase/Antiphase Control and a Biaxial Tilting Unit 118

Zarukin A.A., Zinchenko D.A., Tretyakov D.A. A Three-Axis Milling Center for Producing Positive Models of Lower-Limb Prosthetic Sockets..... 124

Zarukin A.A., Zinchenko D.A., Tretyakov D.A., Boryshnev A.M. Development of a UAV Model and Control System in the MATLAB Simulink Environment..... 129

Zyryanov D.A., Solyony S.V. The Rsr Algorithm for 8-connected Spaces: Modification and Efficiency Evaluation for Route Planning 137

Mechanical Engineering

Vorobyov A.S., Lyubomudrov S.A. Assessment of the Efficiency of Technical Preparation to Manufacture New Products under Pilot and Small-Batch Production Conditions..... 145

Limochko I.Yu., Soloviev I.I., Trifanov I.V. Improving Technological Preparation of Rocket and Space Product Manufacturing at Enterprises of Krasnoyarsk Krai 151

Khrustaleva I.N., Chernykh L.G., Stepanov S.N., Stepanov S.S. Model for Optimization of Mechanical Machining Process Parameters..... 160

TECHNICAL SCIENCES

Product Quality Management. Standardization. Organization of Production

Maltsev S.E., Romanov A.A. Integrated Mechanism for Prioritizing and Using Production Capacity Reserves 167

Maslennikova Yu.L. Management of Unplanned Orders in Pilot Production 172

Nikolaeva A.G., Tsvetkov A.S., Kondratyeva V.M. Development of A Quality Control System for Hydrogen Fuel Transportation Pipes 177

Sofronov A.A., Bulatov V.V. Analysis of Contemporary Software Tools for Technical System Reliability Assessment 182

Tumanov A.Yu., Ivanov E.V. Evolution of Quality Systems and Modeling Methods in the Industry Concept (2.0–6.0) of High-Tech Production 190

Lyapuntsova E.V., Chechnev V.B. Adaptive Tool for Generating and Selecting Alternative Work Plans in Small-Batch Production 194

ECONOMIC SCIENCES

Mathematical, Statistical and Instrumental Methods in Economics

Shchekotova K.S., Rostova E.P. Development of a Game-Theoretic Model for Software Implementation Amidst Institutional Resistance 199

Yartsev D.D. Fuzzy Nature-Based Method for Budget Allocation between Applicant Attracting Channels 205

Regional and Sectoral Economy

Gorshkova L.V. Analysis of the Provision of Medical Care to the Population of Russia: A Regional Aspect 210

Kuznetsova T.I. Industrial Marketplaces as Drivers of Digital Transformation of an Enterprise's Production System in Crisis Conditions 215

Finance

Belskikh I.E., Markelov K.V. Bond Strategies for Financing Innovations at Various Stages of the Company Life Cycle in the Domestic Market 219

Management

Aronchikov A.A., Kudryavtseva A.V. Organizational Aspects of Economic Training in an Innovative Company 223

УДК 004.8

Т.Ю. ВОЙТЕНКО[1], Е.А. КИРИЛЛОВСКИЙ[1], А.В. ФИРЕР[2]
[1]Филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»;
[2]Лесосибирский педагогический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Лесосибирск

СОЗДАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО ЧАТ-БОТА С ЭЛЕМЕНТАМИ ТЕОРИИ РЕШЕНИЯ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ

Ключевые слова: автоматизация; большие языковые модели; искусственный интеллект; чат-бот; теория решения изобретательских задач (**ТРИЗ**); *GigaChat*; *Gradio*; *Python*.

Аннотация. Целью статьи является разработка и программная реализация интерактивного ассистента на базе больших языковых моделей (***LLM***) для автоматизации процесса поиска изобретательских решений. На основе классической методологии ТРИЗ спроектирована логическая и функциональная архитектура программного комплекса, произведена интеграция матрицы ТРИЗ в структуру приложения, а также реализован алгоритм строгого детерминированного поиска изобретательских приемов по координатной матрице Альтшуллера. Настроено программное взаимодействие с *API* языковой модели *GigaChat* для классификации технических противоречий и последующей интеллектуальной генерации итоговых инженерных решений. Разработан интуитивно понятный графический веб-интерфейс пользователя, включающий в себя интерактивные справочные панели, регуляторы креативности и длины ответа для тонкой настройки нейросети. Технологический стек проекта включает язык программирования *Python* и библиотеку *Gradio* для построения локального веб-интерфейса, а в качестве лингвистического ядра интегрирована большая языковая модель *GigaChat*.

Введение

ТРИЗ – теория решения изобретательских задач, разработанная советским ученым, изобретателем и писателем Г.С. Альтшуллером. Проанализировав тысячи изобретений, ученый выделил и систематизировал основные методы и приемы, которые возникают при различных изобретениях, что позволило ему создать свою уникальную методологию для решения изобретательских задач. «ТРИЗ создавалась, чтобы заменить те интуитивные «озарения», которые приводят талантливых инженеров и ученых к выдающимся изобретениям и открытиям, такой стратегией мышления, которая позволяла бы каждому хорошо подготовленному специалисту получать аналогичные результаты» [4].

Вся методология строится на нескольких базовых принципах, применяемых при решении любой изобретательской задачи и реализуемых в рамках алгоритма решения изобретательских задач (**АРИЗ**) [1].

В условиях ускоренного научно-технического прогресса методы систематического поиска инновационных решений приобретают особую актуальность [3]. Теория решения изобретательских задач, разработанная Альтшуллером, остается одной из наиболее структурированных и эффективных методологий. Однако ее освоение требует времени, а инструменты (матрица противоречий, 40 приемов, АРИЗ) могут показаться сложными для начинающих.

Развитие больших языковых моделей (*LLM*) и доступных *API* (в том числе отечественных) открывает новые возможности для создания интерактивных образовательных инструментов [6]. Главным преимуществом *LLM* в контексте автоматизации ТРИЗ является их способность выступать интеллектуальным семантическим интерфейсом, который преодолевает барьер между неструктурированным описанием инженерной проблемы и абстрактными техни-

```python
def get_principles_from_matrix(improve_id, worsen_id):
    try:
        df = pd.read_excel("triz_matrix.xls", header=None)
        cell = df.iloc[improve_id - 1, worsen_id - 1]

        if pd.isna(cell) or str(cell).strip() in ['+', '-', '']:
            return []

        numbers = re.findall(r'\d+', str(cell))
        return [int(n) for n in numbers]
    except Exception as e:
        print(f" ОШИБКА чтения Excel-матрицы: {e}")
        return []
```

Рис. 1. Функция *get_principles_from_matrix*

ческими параметрами методологии.

Прямое использование генеративных моделей ограничено их стохастической природой и склонностью к «галлюцинациям» – искажению строгих фактических данных при работе с объемными, требующими высокой точности структурами. Решением этой проблемы может являться создание гибридных систем, где синтаксический анализ запроса, определение предметной области и финальная интерпретация решений осуществляются *LLM*, а точный поиск по табличным данным производится детерминированным программным алгоритмом.

В статье рассматривается процесс разработки и реализации интерактивного интеллектуального агента (чат-бота), ориентированного на обучение методологическим основам теории решения изобретательских задач (**ТРИЗ**).

Архитектура приложения

Программный комплекс реализован как веб-приложение на языке *Python* с использованием библиотеки *Gradio*, обеспечивающей построение сложного интерактивного интерфейса. Архитектура системы базируется на интеграции алгоритмических методов ТРИЗ с возможностями больших языковых моделей семейства *GigaChat*.

Клиентская часть представляет собой браузерный интерфейс, автоматически открывающийся по локальному адресу после запуска скрипта. Серверная часть отвечает за формирование запросов к языковой модели *GigaChat* от Сбербанка (модель *GigaChat Max*), обеспечивающей генерацию ответов на русском языке с высоким качеством понимания контекста.

Логика ТРИЗ реализована через жестко заданный системный запрос, который предписывает модели последовательно выполнять следующие шаги: уточнить отрасль и формулировку проблемы, затем выявить идеальный результат посредством выделения технического противоречия, применения матрицы противоречий и 40 принципов, а в завершение предложить конкретные идеи с обоснованием используемых принципов.

На самом ответственном и критичном этапе работы приложения – поиске конкретных изобретательских приемов по координатам выявленного противоречия – в архитектуру программного комплекса был внедрен блок жесткой детерминированной логики. Этот программный узел берет на себя задачу математически точной навигации по классической таблице Г.С. Альтшуллера без использования вероятностных нейросетевых алгоритмов, тем самым гарантируя стопроцентную инженерную достоверность извлекаемых базовых решений. На физическом уровне нормативно-справочная матрица противоречий реализована в виде внешнего табличного файла формата *Excel* с наименованием «*triz_matrix.xls*». Выбор именно данного проприетарного формата таблиц обусловлен его максимальным удобством для визуального редактирования, простотой масштабирования и повсеместной распространенностью в корпоративной инженерной среде. Для обеспечения эффективного программного взаимодействия с этим файлом в разрабатываемом проекте задействована высокопроизводительная сторонняя библиотека *pandas*, специализирующаяся на глубоком анализе данных. Непосредственная реализация алгоритма координатного поиска инкапсулирована в рамках специально разработанной функции «*get_principles_from_matrix*» (рис. 1), которая принимает в качестве обязательных входных аргументов два цело-

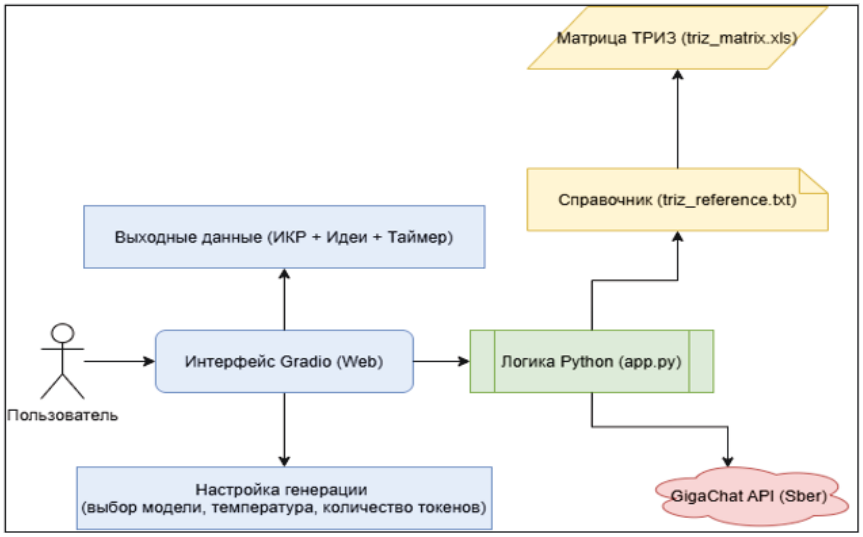


Рис. 2. Архитектура взаимодействия компонентов чат-бота

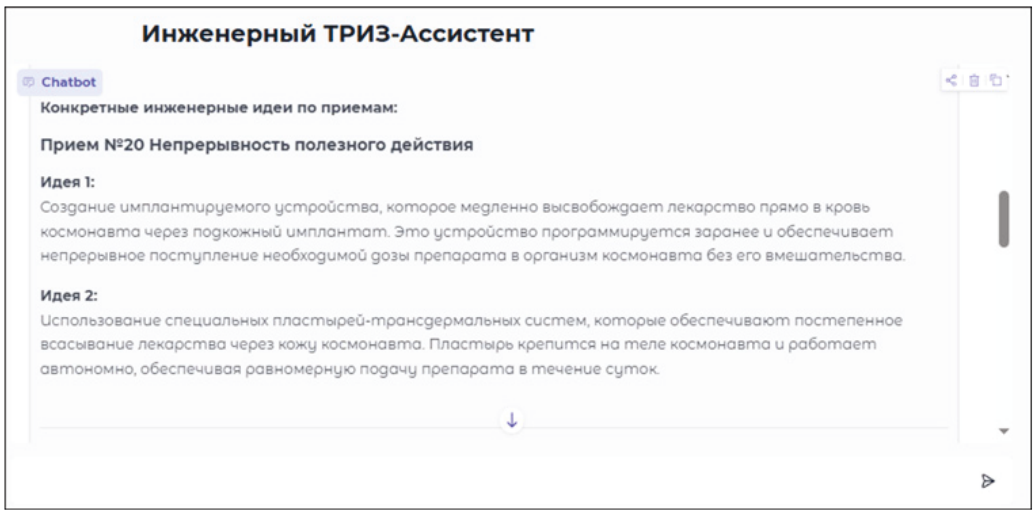


Рис. 3. Пример решения задачи пользователя

численных значения: идентификатор улучшаемого и неизбежно ухудшаемого технического параметра.

Особое внимание при разработке уделялось реализации взаимодействия *LLM* с инструментами (*Function Calling*). На основе текстового описания задачи нейросеть выделяет наиболее вероятные пары технических противоречий (параметры «что улучшаем» и «что ухудшается»). Разработанный алгоритм автоматически обращается к оцифрованной матрице противоречий, и после нахождения релевантных изобретательских приемов (из 40 стандартных принципов) нейросеть формирует итоговый ответ (рис. 2).

Итогом разработки стало создание прототипа веб-приложения, которое способно вести пошаговый диалог по системе ТРИЗ, сохранять контекст беседы и генерировать структурированные решения на основе матрицы противоречий и 40 принципов. Тестирование проводилось на более чем 15 типовых изобретательских задачах различной сложности.

Пример работы чат-бота

Конкретным примером работы может послужить реальная проблема из области космической медицины, где в условиях невесомости

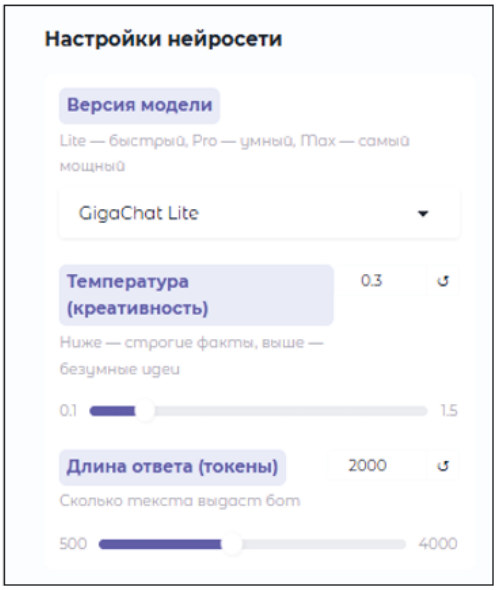


Рис. 4. Настройка генерации ответов

космонавты подвержены «морской болезни», однако соответствующее лекарство нужно принимать малыми дозами. В ходе запроса алгоритм выделил конфликт между временем действия (улучшаемый параметр № 15) и потерей времени (ухудшаемый параметр № 31), нашел прием № 20 («Непрерывность полезного действия») и предложил идею использования трансдермального пластыря (рис. 3).

Среднее время генерации ответа составило 3–8 секунд, что приемлемо для интерактивного обучения. В большей части случаев бот корректно следовал заданному сценарию ТРИЗ, требуя уточнений только при чрезмерно расплывчатых формулировках противоречий со стороны пользователя. Основная сложность, выявленная в ходе тестирования, связана именно с неоднозначностью пользовательских ответов на открытые вопросы – это решается более жесткой формулировкой промпта и использованием более специализированных моделей нейросетей.

В проектах, специализирующихся на тесной работе с пользователем, крайне важной является разработка удобного и полезного интерактивного интерфейса. В рамках данного проекта этим могут послужить, например, ползунки ограничения токенов и температуры, технические справочники, выбор версии модели нейросети (рис. 4).

Отдельным преимуществом может быть внедрение блока готовых тестовых примеров (шаблонов), которые помогают пользователю понять правильный формат взаимодействия с нейросетью.

Заключение

Разработанный комплекс может быть интегрирован в рабочие процессы инженерно-конструкторских отделов предприятий и образовательный процесс вузов. Его применение позволяет снизить когнитивный порог входа в методологию ТРИЗ, автоматизировать рутинные процессы поиска параметров и сократить временные затраты.

Перспективы дальнейшего развития включают расширение функциональности за счет интеграции интерактивной матрицы противоречий в интерфейс, дополнения базы знаний примерами реальных задач и критериями оценки предложенных идей, а также реализацию автоматического экспорта результатов в форматы *PDF* или *Word*. Возможна также поддержка нескольких языковых моделей через унифицированный интерфейс и развертывание приложения на облачных платформах для более широкого доступа.

Список литературы

1. Альтшуллер, Г.С. Найти идею: введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач / Г.С. Альтшуллер. – М. : Альпина Паблишер, 2025. – 404 с.
2. Илясов, П.А. Методы оптимизации обработки естественного языка в реальном времени для виртуальных помощников / П.А. Илясов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2025. – С. 632–634.
3. Кальянов, А.Д. Применение виртуальных ассистентов для оптимизации бизнес-процессов / А.Д. Кальянов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2025. – С. 641–643.
4. Меерович, М. Технология творческого мышления / М. Меерович, Л. Шрагина. – М. : Альпина Паблишер, 2026. – 506 с.
5. Мокроусов, М.Н. Автоматизированная система нормализации естественно-языковых текстов / М.Н. Мокроусов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 3(27). – С. 93–96.
6. Фирер, А.В. Разработка чат-бота как цифрового инструмента для подготовки к ОГЭ и ЕГЭ по русскому языку / А.В. Фирер, Т.Ю. Войтенко, А.Е. Вавилова, М.А. Морозов // Глобальный научный потенциал. – 2025. – Т. 1. – № 12(177). – С. 122–126.

References

1. Al'tshuller, G.S. Nayti ideyu: vvedeniye v TRIZ – teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach / G.S. Al'tshuller. – M. : Al'pina Pablisher, 2025. – 404 s.
2. Ilyasov, P.A. Metody optimizatsii obrabotki yestestvennogo yazyka v real'nom vremeni dlya virtual'nykh pomoshchnikov / P.A. Ilyasov // Molodyye uchenyye v reshenii aktual'nykh problem nauki : sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (s mezhdunarodnym uchastiyem). – Krasnoyarsk : Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologiy im. akad. M.F. Reshetneva, 2025. – S. 632–634.
3. Kal'yanov, A.D. Primeneniye virtual'nykh assistentov dlya optimizatsii biznes-protsessov / A.D. Kal'yanov // Molodyye uchenyye v reshenii aktual'nykh problem nauki : sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (s mezhdunarodnym uchastiyem). – Krasnoyarsk : Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologiy im. akad. M.F. Reshetneva, 2025. – S. 641–643.
4. Meyerovich, M. Tekhnologiya tvorcheskogo myshleniya / M. Meyerovich, L. Shragina. – M. : Al'pina Pablisher, 2026. – 506 s.
5. Mokrousov, M.N. Avtomatizirovannaya sistema normalizatsii yestestvenno-yazykovykh tekstov / M.N. Mokrousov // Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve. – 2015. – № 3(27). – S. 93–96.
6. Firer, A.V. Razrabotka chat-bota kak tsifrovogo instrumenta dlya podgotovki k OGE i YEGE po russkomu yazyku / A.V. Firer, T.YU. Voytenko, A.Ye. Vavilova, M.A. Morozov // Global'nyy nauchnyy potentsial. – 2025. – T. 1. – № 12(177). – S. 122–126.

© Т.Ю. Войтенко, Е.А. Кирилловский, А.В. Фирер, 2026

УДК 004.9

М.К. ГАЛОВА, К.С. КОРОТКОВ, А.В. ГОЛАН, Т.А. СТЕПАНОВА
ФГБОУ «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА СЛЕЖЕНИЯ ЗА НАСЕКОМЫМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТЕЙ ИХ МИГРАЦИИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ КОНТРОЛЯ ПОПУЛЯЦИИ

Ключевые слова: автономные системы; мониторинг насекомых; программно-аппаратный комплекс; *Hailo*-8; *YOLOv*8.

Аннотация. Цель исследования состоит в разработке автономного программно-аппаратного комплекса для обнаружения насекомых-вредителей на основе машинного зрения и нейросетевого распознавания объектов. Задачи исследования включали выбор и интеграцию аппаратных компонентов, формирование набора изображений для обучения и проверки модели, настройку алгоритма распознавания, организацию автономного питания и экспериментальную проверку лабораторного образца. Гипотеза исследования заключалась в том, что использование *Raspberry Pi* совместно с нейроускорителем *Hailo*-8 и моделью *YOLOv*8 позволит выполнять обработку изображений непосредственно на устройстве без постоянного обращения к удаленным вычислительным ресурсам. В работе применены методы машинного зрения, нейросетевого распознавания объектов, обучение модели на смешанной выборке изображений, оценка *accuracy* и анализ последовательности обнаружений. В результате разработан лабораторный образец комплекса, обеспечивающий локальное обнаружение насекомых-вредителей в видеопотоке и автономную работу устройства. Испытания в уличных условиях подтвердили работоспособность выбранной архитектуры и возможность накопления данных о появлении вредителей. Предложенное решение может быть использовано как основа для создания распределенной системы мониторинга и последующей оценки траекторий перемещения вредителей.

Сельское хозяйство является одной из ключевых отраслей экономики, которая определяет продовольственную безопасность страны. Из-за того, что насекомые-вредители массово распространяются, снижается урожайность. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (**ФАО**), ежегодные потери урожая составляют до 40 % от общего объема производства, а экономический ущерб достигает нескольких миллиардов долларов. Традиционные методы борьбы с вредителями трудоемки, вредят экологии и сопровождаются перерасходом пестицидов [1].

В рамках работы был создан автономный комплекс, осуществляющий обнаружение вредителей, прогноз миграции и контроль популяции в реальном времени. Комплекс позволит специалистам получить полный прогноз движения вредителей за 48 часов и точечно воздействовать на объекты. Установка не требует подключения к сети Интернет, использует нейросети и специализированный процессор *Hailo*-8 для обработки видеопотока [2] в режиме реального времени. Использование нескольких модулей для получения данных позволяет строить карты перемещения вредителей и прогнозировать очаги скопления [3].

Установка состоит из микрокомпьютера *Raspberry Pi* 5 с четырехъядерным процессором 2,4 ГГц [4] и нейроускорителя *Hailo*-8, входящего в состав официального модуля *Raspberry Pi AI HAT+*. Для реализации машинного зрения использована камера ночного видения 52*Pi* с разрешением 1080*p*, ИК-подсветкой и объективом 3,6 мм с регулировкой фокуса. Два сервопривода *MG*90*S* позволяют устранить дрожание камеры, сохраняя при этом точность [5]. Для автоматического наведения камеры по двум осям использован 16-канальный ШИМ-контроллер *PCA*9685. Вся система питается от солнечной панели и буферного литий-же-

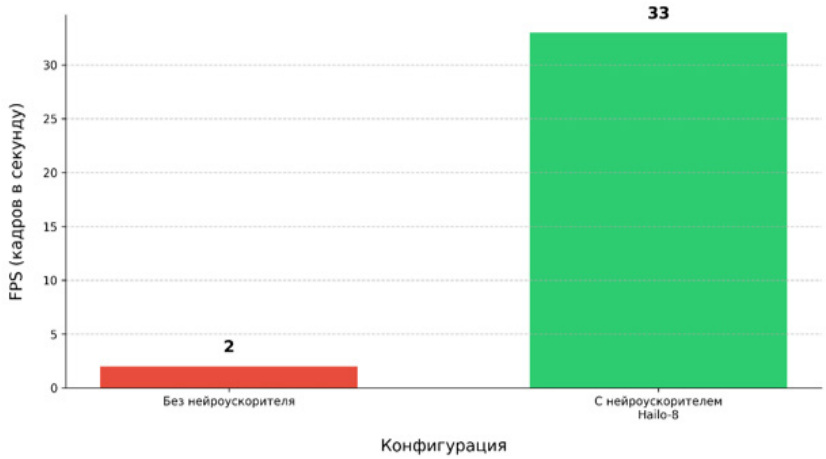


Рис. 1. График сравнения частоты обработки кадров с нейроускорителем и без

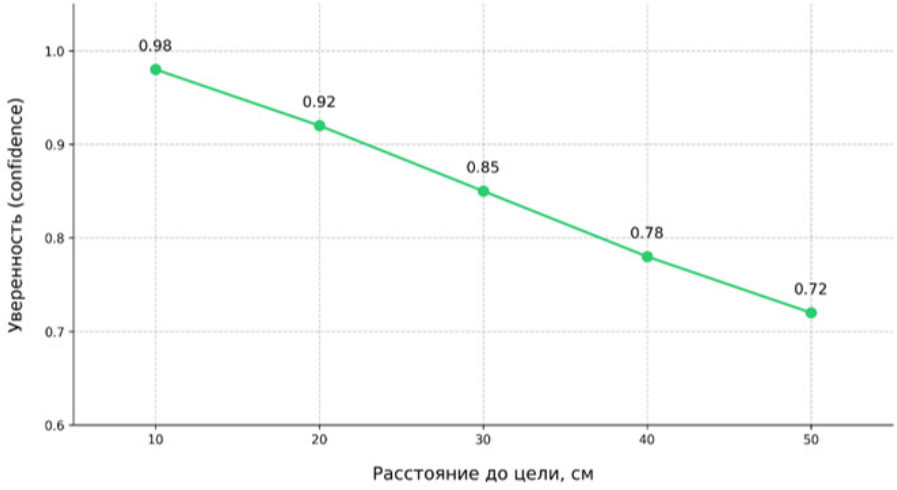


Рис. 2. График зависимости уверенности распознавания от расстояния

лезо-фосфатного аккумулятора (*LiFePO*4). Программное обеспечение было разработано на языке *Python* в среде *Raspberry Pi OS*. Были использованы библиотеки: *picamera*2, *Ultralytics* и *adafruit_servokit* [6]. Основная нейронная сеть программного комплекса реализуется на архитектуре *YOLOv*8*n* [7]. Модель обучена методом *transfer learning* на собственном датасете из 300 изображений, собранных в различных условиях. Обучение проводилось с помощью 50 эпох с разрешением 640 × 640 пикселей, оптимизатором *Adam* и скоростью обучения 0,001 [8].

На первом этапе фиксировалась частота обработки кадров (***FPS***) на целевой платформе: на процессоре *Raspberry Pi* 5 средняя частота составила около двух кадров в секунду, при использовании нейроускорителя *Hailo*-8 производительность возросла до 33 кадров в секунду, что в 15–20 раз выше. Таким образом, применение *Hailo*-8 является важным условием для реализации системы (рис. 1).

В ходе тестирования модели были получены следующие результаты. Оценивалась зависимость уверенности распознавания от расстояния до цели. Измерения проводились при дневном освещении в диапазоне от 10 до 50 см. При расстоянии 10 см уверенность составляет 0,98. В диапазоне 20–30 см она стабильно держится на уровне 0,85–0,95. При удалении до 50 см уверенность снижается до 0,72. Модель уверенно распознает насекомое на расстояниях до 50 см, а на дистанции 20–30 см работает с максимальной точностью

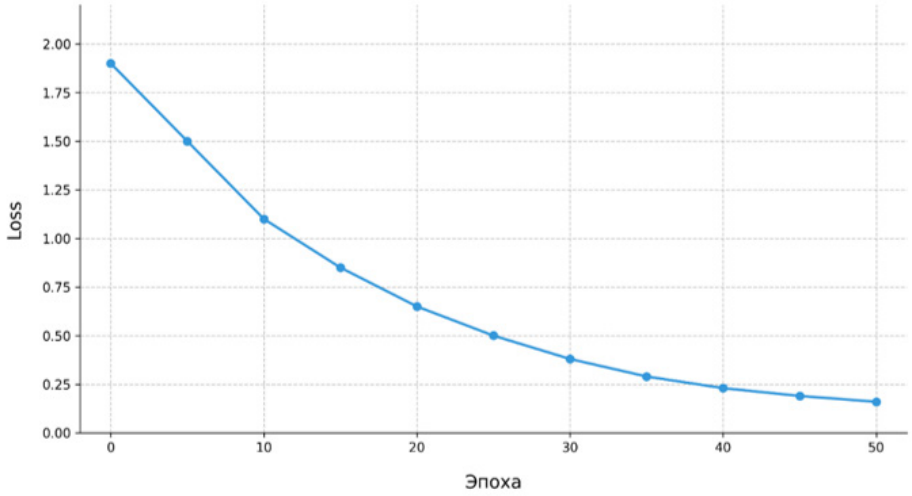


Рис. 3. График снижения функции потерь в процессе обучения

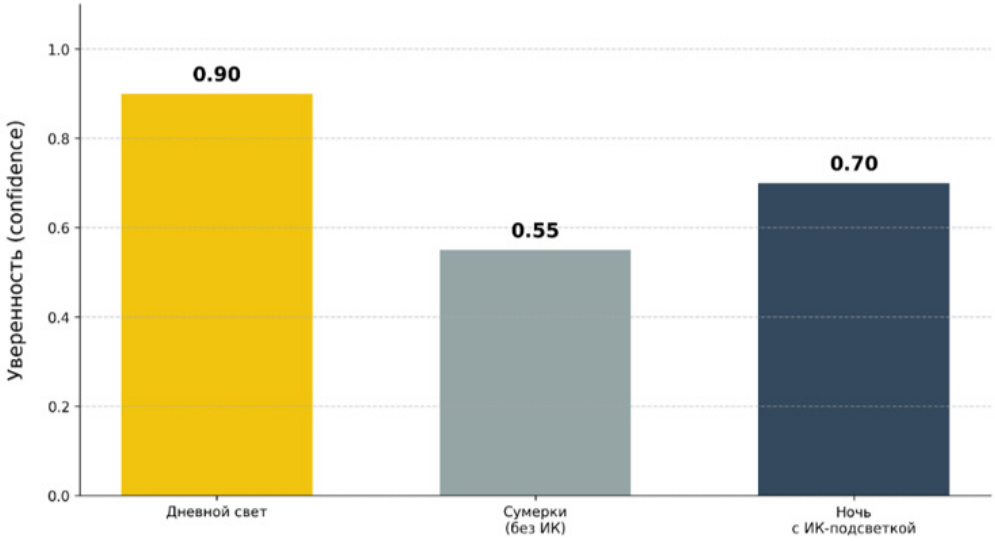


Рис. 4. График зависимости уверенности распознавания от условий освещенности

(рис. 2).

В процессе обучения нейросети фиксировалось снижение функции потерь на каждой эпохе. График снижения функции потерь представлен на рис. 3. На первых эпохах значение *loss* составило 1,9, а к 50-й эпохе оно снизилось до 0,16. Полученные результаты подтверждают успешное обучение модели и отсутствие признаков ее переобучения.

Также работа комплекса была протестирована при разных условиях освещения. При дневном свете уверенность достигает 0,9. В сумерках без ИК-подсветки она падает до 0,55, что недостаточно для практического применения. При включении встроенной ИК-подсветки уверенность возрастает до 0,7, а дальность распознавания увеличивается до 2–3 метров. График зависимости уверенности распознавания от освещения представлен на рис. 4.

Программно-аппаратный комплекс показал воспроизводимость результатов, точность определения групп насекомых и их передвижения. Важным результатом исследования является полученный опыт в обучении нейронных сетей и использовании новейших моделей

обработки видеопотока. В дальнейшем планируется расширить функциональные возможности комплекса за счет интеграции многоканальной системы мониторинга, включающей датчики освещенности [9], температуры и влажности [10].

Список литературы

1. Zhang, X. Design and operation of a Peucedani Radix weeding device based on YOLOV5 and a parallel manipulator / X. Zhang, C. Cao, K. Luo [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2023. – Vol. 14. – P. 5–7.
2. Сердюков, В.В. Измерение фазовых сдвигов сигналов с использованием быстрого преобразования Фурье в GNU Radio / В.В. Сердюков, С.Е. Калюжная, А.В. Голан [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. – 2024. – Т. 8. – № 4. – С. 469–481.
3. Liu, L. Deep learning based automatic detection of agricultural pests: A survey / L. Liu [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2021. – Vol. 12. – Art. 708202. – P. 2–5.
4. Tavasalkar, D. Hands-On Robotics Programming with C++: Leverage Raspberry Pi 3 and C++ libraries to build intelligent robotics applications / D. Tavasalkar. – Packt Publishing Ltd, 2019. – P. 13.
5. Yang, L. Electrochemically-driven actuators: from materials to mechanisms and from performance to applications / L. Yang [et al.] // Chemical Society Reviews. – 2024. – Vol. 53. – No. 11. – P. 5956–6010.
6. Елисеев, А.В. Robotic constructor as a means of teaching C++ programming to high school students / А.В. Елисеев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. – 2024. – Т. 21. – № 3. – С. 297–307.
7. Redmon, J. YOLOv3: An Incremental Improvement / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv preprint. – 2018. – P. 4.
8. Duchesnay, E. Statistics and machine learning in Python / E. Duchesnay, T. Lofstedt, F. Younes. – 2025. – P. 206.
9. Zou, K. A modified U-net with a specific data argumentation method for semantic segmentation of weed images in the field / K. Zou, X. Chen, Y. Wang [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 187. – Art. 106242. – P. 3.
10. Editorial: Agricultural sensors and systems for field detection // Frontiers in Plant Science. – 2023. – Vol. 14. – P. 6.

References

2. Serdyukov, V.V. Izmereniye fazovykh sdvigov signalov s ispol'zovaniyem bystrogo preobrazovaniya Fur'ye v GNU Radio / V.V. Serdyukov, S.Ye. Kalyuzhnaya, A.V. Golan [i dr.] // Ural Radio Engineering Journal. – 2024. – T. 8. – № 4. – S. 469–481.
6. Yeliseyev, A.V. Robotic constructor as a means of teaching C++ programming to high school students / A.V. Yeliseyev // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Informatizatsiya obrazovaniya. – 2024. – T. 21. – № 3. – S. 297–307.

© М.К. Галова, К.С. Коротков, А.В. Голан, Т.А. Степанова, 2026

УДК 519.6

Ю.А. ИЗВЕКОВ, К.О. СВЕТУС, В.О. КРАЙНЯЯ, К.Д. ВАЛЕЕВА
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ В ТРУБОПРОВОДАХ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Ключевые слова: воздушный поток; вихри Дина; искусственный интеллект; система управления; турбулентность; уравнения Навье – Стокса; физически-информированные нейронные сети.

Аннотация. Цель настоящей работы заключается в создании и применении физически-информированных нейронных сетей для управления воздушным потоком в трубопроводе с двумя изгибами под углом 90°. Для ее достижения поставлены задачи: составить математическую модель, рассмотреть математические методы решения полученной задачи, осуществить программную реализацию, обучить нейронную сеть, проанализировать полученные результаты. В работе использованы методы математического моделирования, методы обнаружения дрейфа данных и вычислительной гидродинамики. Предложенная в исследовании архитектура системы управления основана на решении уравнений Навье – Стокса и использовании данных датчиков воздушного потока. Исследование позволило снизить турбулентность и подавить вихри Дина путем динамического изменения положения направляющих лопаток.

Современные вентиляционные и технологические системы содержат значительное количество участков трубопроводов со сложной геометрией [1]. Наличие поворотов и изгибов приводит к возникновению нестационарных режимов движения воздуха, сопровождающихся ростом гидравлических потерь и снижением энергетической эффективности оборудования. Одной из наиболее сложных проблем является образование вихрей Дина, возникающих вследствие действия центробежных сил [4]. Развитие технологий искусственного интеллекта позволило применять физически-информированные нейронные сети для решения подобных задач [3].

Исследуемая система представляет собой квадратный воздуховод размером 1 200 × 1 200 мм с двумя последовательными поворотами на девяносто градусов [2]. Внутри каждого изгиба устанавливается каскад направляющих лопаток. Для получения информации о состоянии воздушного потока используются матрицы термоанемометрических датчиков, размещенные до и после направляющего аппарата [5]. При прохождении воздушного потока через изгиб наблюдаются отрыв потока, образование областей повышенного давления и формирование парных вихрей Дина. Для решения задачи предложено использовать физически-информированную нейронную сеть, учитывающую уравнения Навье – Стокса и условие неразрывности потока [6]. Архитектура сети включает входной слой с пространственными координатами, скрытые слои и выходной слой, формирующий значения скорости и давления [7]. Работа системы предполагает офлайн-обучение модели и последующее онлайн-управление в режиме реального времени с использованием промышленного компьютера и исполнительных механизмов.

В трубе установлен каскад тонких направляющих лопаток непосредственно внутри самого изгиба (по диагонали поворота). Для отслеживания состояния воздушного потока в трубе «ДО» и «ПОСЛЕ» лопаток установлены датчики, представляющие собой матрицы (сетки) из термоанемометров (например, 4 × 4 или 5 × 5 точек в сечении), чтобы сеть видела реальный двумерный профиль перекоса потока. Для работы управляющего скрипта на объекте требу-

ется промышленный персональный компьютер (**ПК**) с тензорными ядрами (например, линейка *NVIDIA Jetson AGX*), который сможет крутить оптимизационный алгоритм нейросети со скоростью обработки сигналов датчиков (от 10 до 50 Гц) [8].

Необходимо решить следующие проблемы:

– отрыв потока у внутренней стенки изгиба;

– зона повышенного давления у внешней стенки;

– образование парных вихрей Дина из-за действия центробежных сил;

– поперечные пульсации скорости (v, w) и локальная завихренность;

– искажение профиля скорости, ведущее к росту потерь давления и шума.

Для этого необходимо разработать систему управления, которая динамически корректирует углы лопаток направляющего аппарата для компенсации инерции воздуха и подавления турбулентных эффектов на выходе из изгиба [10].

Разработанная *PINN* обучается решать краевые задачи на основе уравнения Навье – Стокса в декартовых координатах с учетом геометрии изгиба, заданной через функцию расстояния (*Signed Distance Function* – ***SDF***) [9].

Запишем уравнения и приведем граничные условия.

Уравнение Навье – Стокса (для несжимаемого потока):

$$\rho(\partial u/\partial t + u\cdot\nabla u) = -\nabla p + \mu\nabla\hat{}2u,$$

где $u = (u, v, w)$ – вектор скорости; p – давление; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость.

Условие несжимаемости:

$$\nabla u = 0.$$

Граничные условия:

– на стенках трубы: условие прилипания $u = v = w = 0$;

– лопатки моделируются как внутренние подвижные границы с углами $a_i(t)$.

Учтем функцию потерь (*Loss Function*) *PINN*, которая включает:

1) физически-информированную часть – штраф за нарушение уравнений Навье – Стокса и условия несжимаемости;

2) управляющую часть – минимизацию:

– поперечных компонент скорости: $Loss_v = //v//^2$, $Loss_w = //w//^2$;

– продольной завихренности: $Loss_{vortex} = //\omega_x//^2$, где ω_x – x-компонента ротора скорости $\omega = \nabla \times u$;

– отклонения продольной скорости от целевого значения: $Loss_u = //u - U_{main}//^2$.

Итоговая функция потерь:

$$Loss = \lambda_1 \cdot Loss_{NS} + \lambda_2 \cdot Loss_v + \lambda_3 \cdot Loss_w + \lambda_4 \cdot Loss_{vortex} + \lambda_5 \cdot Loss_u,$$

где λ_i – весовые коэффициенты [11].

Используем двухэтапный режим работы.

1. Офлайн-обучение (заранее): *PINN* обучается на суперкомпьютере или мощной видеокарте во всем диапазоне расходов вентилятора и возможных положений лопаток. Сеть изучает физику этого конкретного изгиба 1 200 мм.

2. Онлайн-управление (на объекте): обученная *PINN* работает как суррогатная модель. Получая данные от датчиков «ДО», она просчитывает комбинацию углов лопаток a_i, которая даст минимальный $Loss_{vortex}$ на выходе, и посылает сигнал на приводы. Данные от датчиков «ПОСЛЕ» используются для мгновенной корректировки (дообучения) весов.

В результате процесс моделирования показал, что использование *PINN* позволяет снизить интенсивность вторичных течений и уменьшить неравномерность распределения скоростей по сечению трубопровода. Предварительные расчеты свидетельствуют о снижении гидравлических потерь и повышении эффективности работы вентиляционной системы [8]. Предлагаемый подход обладает высокой скоростью вычислений по сравнению с классическими *CFD*-моделями и может применяться в интеллектуальных системах управления инженерными объектами.

Дополнительный анализ определил, что применение физически-информированных нейронных сетей обеспечивает устойчивую работу системы управления при изменении расхода воздуха и внешних возмущениях, что подтверждает перспективность дальнейших исследований в данном направлении.

Разработанный подход обеспечивает снижение интенсивности вихрей Дина, уменьшение поперечных пульсаций скорости и выравнивание профиля потока после прохождения изгибов трубопровода. Использование физически-информированных нейронных сетей является перспективным направлением развития

интеллектуальных систем управления воздушными потоками и может быть использовано при проектировании современных вентиляционных комплексов.

Список литературы

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1991. – 600 с.
2. Бюшгенс, Г.С. Аэродинамика самолета: динамика продольного и бокового движения / Г.С. Бюшгенс, Р.В. Студнев. – М. : Машиностроение, 1979. – 352 с.
3. Лыков, А.В. Теория теплопроводности : учебное пособие для студентов теплотехнических специальностей высших учебных заведений / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
4. Лебедев, А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях / А.Н. Лебедев. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.
5. Лебедев, А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях / А.Н. Лебедев. – М. : Радио и связь, 1989. – 222 с.
6. Моллер, А.Б. Концепция построения современных моделей прокатки на сортовых станах / А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.С. Лимарев, Д.В. Назаров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – № 1(17). – С. 64–67.
7. Терентьева, Е.В. Анализ и выбор архитектуры нейронной сети для моделирования качества смеси сырья / Е.В. Терентьева, Ю.А. Извеков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2024 года. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 332.
8. Торшина, О.А. Математическое моделирование процесса теплопроводности в металлургическом производстве / О.А. Торшина, Н.А. Плугина, К.О. Светус // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 5 (167). – С. 197–200.
9. Торшина, О.А. Применение теории конструкционного риск-анализа к определению влияния окалины на нагрев заготовок в печах и их качество / О.А. Торшина, Л.В. Смирнова, К.О. Светус // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 4(166). – С. 55–58.
10. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1 / К. Флетчер. – М. : Мир, 1991. – 502 с.
11. Torshina, O.A. Mathematical modeling and visualization of the dynamics of immune reactions / O.A. Torshina, E.A. Moskvina, K.O. Svetus // Science and Business: Ways of Development. – 2024. – № 2 (152). – P. 28–31.

References

1. Abramovich, G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika / G.N. Abramovich. – 5-ye izd., pererab. i dop. – M. : Nauka, 1991. – 600 s.
2. Byushgens, G.S. Aerodinamika samoleta: dinamika prodol'nogo i bokovogo dvizheniya / G.S. Byushgens, R.V. Studnev. – M. : Mashinostroyeniye, 1979. – 352 s.
3. Lykov, A.V. Teoriya teploprovodnosti : uchebnoye posobiye dlya studentov teplotekhnicheskikh spetsial'nostey vysshikh uchebnykh zavedeniy / A.V. Lykov. – M. : Vysshaya shkola, 1967. – 599 s.
4. Lebedev, A.N. Modelirovaniye v nauchno-tekhnicheskikh issledovaniyakh / A.N. Lebedev. – M. : Radio i svyaz', 1989. – 224 s.
5. Lebedev, A.N. Modelirovaniye v nauchno-tekhnicheskikh issledovaniyakh / A.N. Lebedev. – M. : Radio i svyaz', 1989. – 222 s.
6. Moller, A.B. Kontseptsiya postroyeniya sovremennykh modeley prokatki na sortovykh stanakh / A.B. Moller, O.N. Tulupov, A.S. Limarev, D.V. Nazarov // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2007. – № 1(17). – S. 64–67.
7. Terent'yeva, Ye.V. Analiz i vybor arkhitektury neyronnoy seti dlya modelirovaniya kachestva smesi syr'ya / Ye.V. Terent'yeva, YU.A. Izvekov // Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya : tezisy dokladov 82-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii,

Magnitogorsk, 22–26 aprelya 2024 goda. – Magnitogorsk : Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova, 2024. – S. 332.

8. Torshina, O.A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa teploprovodnosti v metallurgicheskom proizvodstve / O.A. Torshina, N.A. Plugina, K.O. Svetus // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 5 (167). – S. 197–200.

9. Torshina, O.A. Primeneniye teorii konstruktsionnogo risk-analiza k opredeleniyu vliyaniya okaliny na nagrev zagotovok v pechakh i ikh kachestvo / O.A. Torshina, L.V. Smirnova, K.O. Svetus // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 4(166). – S. 55–58.

© Ю.А. Извеков, К.О. Светус, В.О. Крайняя, К.Д. Валеева, 2026

УДК 004.032.26

Н.К. КАЗАКОВ[1, 2], Н.А. ИВЛИЕВ[2]
[1]Научный центр мирового уровня «Интеллектуальные беспилотные авиационные системы»;
[2]ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

ВЛИЯНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВХОДНЫХ ДАННЫХ И ВЫБОРА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТЫ СВЕТОВОГО ПЯТНА КВАДРАНТНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА

Ключевые слова: квадрантный фотодетектор; многослойный перцептрон; нейронная сеть; определение координат; отбеливание; позиционно-чувствительный детектор; предобработка данных; радиально-базисная сеть.

Аннотация. Цель работы – повышение точности нейросетевого определения координаты центра светового пятна квадрантного фотодетектора за счет согласованного выбора представления входных данных, алгоритма оптимизации и архитектуры модели. Задачи работы: оценить влияние состава вектора признаков и преобразования входных данных, сравнить нейросетевые архитектуры и разделить вклад преобразования данных и адаптивности оптимизатора. Гипотеза исследования: оптимальное преобразование входных данных зависит от типа нейросетевой модели, а согласованный выбор представления данных, оптимизатора и архитектуры дает мультипликативный выигрыш в точности. Исследование выполнено на экспериментальном наборе из 79 200 наблюдений, собранном при двенадцати конфигурациях оптической установки; систематически сравнивались четыре состава вектора признаков, пять преобразований данных (центрирование, стандартизация, *PCA*- и *ZCA*-отбеливание), адаптивный и неадаптивный алгоритмы оптимизации, а также нейросетевые архитектуры: многослойные перцептроны различной глубины, в том числе с остаточными связями, одномерная сверточная сеть и сеть радиально-базисных функций. Качество оценивалось на отложенной тестовой выборке с усреднением по нескольким запускам и доверительными интервалами. Установлено, что объединение исходных и нормированных фототоков снижает среднюю абсолютную ошибку примерно втрое, однако только при условии масштабирования признаков; отбеливание дает дополнительное снижение ошибки на 10–15 %, а увеличение глубины перцептрона с одного до четырех слоев – еще в 1,7 раза. Обнаружено взаимодействие между преобразованием данных и типом модели: отбеливание, полезное перцептрону, существенно ухудшает сеть радиально-базисных функций; неадаптивный градиентный спуск без масштабирования признаков расходится. Лучшая конфигурация достигает средней абсолютной ошибки около 20 мкм в диапазоне смещений ±3,75 мм; результаты применимы при проектировании систем позиционирования на основе квадрантных фотодетекторов.

Введение

Определение положения объектов по оптическим сигналам актуально во многих областях – от автоматической юстировки и лазерной локации до наведения терминалов оптической связи; для измерения смещения светового пятна широко применяются позиционно-чувствительные детекторы, вычисляющие положение по относительным значениям фототоков [1]. Наиболее распространен квадрантный фотодетектор (**КД**): он обладает высокой скоростью отклика, широкой полосой пропускания и высокой чувствительностью [2; 3], однако его применение ограничивается нелинейной зависимостью сиг-

налов от положения пятна [4], «слепыми зонами» и неоднородностью интенсивности [5]. Классические методы аппроксимации – полиномиальная регрессия [6] и аналитические модели [7] – либо уступают по точности, либо требуют трудоемкой калибровки.

В последние годы для обработки сигналов КД применяются искусственные нейронные сети: перцептрон с одним скрытым слоем [8] и сеть радиально-базисных функций (*RBF*-сеть) [9] превосходят традиционные методы и адаптируются к шумам и неоднородности отклика фотодиодов. Однако основное внимание в известных работах уделяется выбору модели, тогда как формирование признаков и преобразование данных рассматриваются лишь попутно, и их вклад отдельно не оценивается.

Целью настоящей работы является систематическая экспериментальная оценка влияния трех факторов на точность нейросетевого определения координаты светового пятна КД: а) состава вектора входных признаков; б) преобразования входных данных; в) архитектуры нейросетевой модели. Особое внимание уделяется взаимодействию этих факторов: показано, что оптимальное преобразование данных зависит от типа модели.

1. Квадрантный детектор и постановка задачи

КД состоит из четырех фотодиодов (квадрантов) на общей подложке, разделенных узкими зазорами; положение центра пятна определяется по соотношению фототоков A, B, C, D.

В классическом подходе смещение оценивается нормированной разностью суммарных токов пар квадрантов с последующей калибровочной функцией; недостатки подхода – нелинейность, зависимость от размера и формы пятна и ограниченный линейный участок характеристики [4; 6].

Задача ставится как задача регрессии: по вектору признаков s, сформированному из фототоков квадрантов, нейросетевая модель $f_w(s) \approx x$ предсказывает координату x центра пятна; параметры w определяются обучением на экспериментальных данных.

2. Экспериментальные данные и протокол исследования

2.1. Набор данных.

Экспериментальные данные собраны на оптоэлектронной установке, включающей КД (фоточувствительная область 2,2 мм, по 1,1 мм на секцию), лазерный источник и опорно-поворотное устройство. Пятно перемещалось по одной координате в диапазоне ±3,75 мм. Варьировались шаг смещения пятна между отсчетами (625 нм и 6 250 нм), расстояние между линзой и детектором (1, 2 и 3 мм) и направление прохода, что дает 12 конфигураций; итоговый набор содержит 79 200 наблюдений. Наблюдения у границ диапазона, где пятно частично выходит за пределы фоточувствительной области, не исключались: поведение моделей там рассматривается как часть задачи.

Каждое наблюдение включает фототоки четырех квадрантов A, B, C, D, их нормированные значения и суммарную амплитуду $S = A + B + C + D$, а также истинную координату x центра пятна.

2.2. Наборы признаков.

Исследовались четыре варианта вектора входных признаков: *raw*4 – исходные фототоки (A, B, C, D); *norm*4 – нормированные фототоки (A/S, B/S, C/S, D/S); *feats*8 – объединение *raw*4 и *norm*4 (восемь признаков), аналогично [8]; *feats*9 – *feats*8, дополненный суммарной амплитудой S.

2.3. Преобразования данных.

К каждому набору признаков применялось одно из пяти преобразований (параметры всех преобразований вычислялись только по обучающей выборке): без преобразования; центрирование: $s' = s - \mu$; стандартизация: $s' = (s - \mu)/\sigma$ покомпонентно; *PCA*-отбеливание: $s' = \Lambda^{-1/2} U^T (s - \mu)$, где $\Sigma = U\Lambda U^T$ – собственное разложение ковариационной матрицы обучающей выборки; *ZCA*-отбеливание: $s' = U\Lambda^{-1/2}U^T(s - \mu)$ – отбеливание с возвратом в исходный базис.

После отбеливания ковариационная матрица признаков становится единичной: устраняются и различия масштабов, и корреляции. Для устойчивости собственные числа ограничивались снизу величиной $10^{-6}\lambda_{max}$ (см. раздел 4.2).

2.4. Модели.

Сравнивались следующие нейросетевые архитектуры: *MLP-d* – многослойный перцептрон с d скрытыми слоями по 64 нейрона, функция активации *ReLU* [10], инициализация Кайминга [11]; выход – один нейрон (координата). Исследовались глубины $d = 1…8$.

Таблица 1. Средняя абсолютная ошибка (*MAE*, мм) на тестовой выборке для комбинаций «набор признаков × преобразование». *MLP* с одним скрытым слоем, среднее по трем запускам

Признаки	Без преобр.	Центрир.	Стандарт.	*PCA*-отбел.	*ZCA*-отбел.
*raw*4	0,776	0,842	0,164	0,136	0,140
*norm*4	0,437	0,320	0,191	0,141	0,134
*feats*8	0,914	0,807	0,057	0,045	0,046
*feats*9	1,387	1,311	0,051	0,045	0,048

MLP-d-res – тот же перцептрон с остаточными (*residual*) связями [12] вокруг каждого скрытого слоя одинаковой размерности: $h_{i+1} = \varphi(W_i h_i + b_i) + h_i$. *CNN* – одномерная сверточная сеть: вектор *feats*8 рассматривается как сигнал длины 4 (квадранты) с двумя каналами (исходные и нормированные токи); два сверточных слоя с ядром 3 (c_1 и c_2 фильтров), затем полносвязная часть. Конфигурации: *CNN-M* (c = 32,64) и *CNN-L* (c = 64,128). *RBF-m* – сеть радиально-базисных функций [13] с m гауссовыми базисными функциями: $f(s) = \sum_{j=1}^{m} w_j exp(-\|s - c_j\|^2/2\sigma_j^2)$. Центры c_j инициализировались алгоритмом k-средних по обучающей выборке, ширины – медианным расстоянием между центрами; центры и ширины дообучались градиентно.

2.5. Протокол обучения и оценивания.

Данные разделялись на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70/15/15 % со стратификацией по конфигурации установки. Модели обучались с функцией потерь *MSE* (пакет 4096) алгоритмом *Adam* [14] с шагом 0,005; влияние выбора оптимизатора исследуется в разделе 3.3. Число эпох: 300 в серии признаков и преобразований (раздел 3), 400 при отборе архитектур, 800 для итоговых оценок (табл. 3). Итоговые веса выбирались по минимуму средней абсолютной ошибки на валидационной выборке.

Качество оценивалось на тестовой выборке по средней абсолютной ошибке (***MAE***), медианной абсолютной ошибке (***MedAE***), корню из среднеквадратичной ошибки (***RMSE***) и максимальной абсолютной ошибке (***MaxAE***).

Каждая конфигурация обучалась при 3–5 значениях начального зерна; в таблицах даны среднее и полуширина 95 % доверительного интервала Стьюдента.

3. Влияние состава признаков и преобразования данных

3.1. Точность комбинаций «признаки × преобразование».

В первой серии экспериментов модель была зафиксирована (*MLP*-1, один скрытый слой из 32 нейронов, как в [8]) и варьировались набор признаков и преобразование. Результаты приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следуют три вывода.

Во-первых, объединение исходных и нормированных фототоков (*feats*8) при корректном масштабировании дает примерно трехкратное снижение ошибки по сравнению с каждым набором по отдельности (0,045 мм против 0,134–0,136 мм): нормированные признаки описывают форму распределения между квадрантами, а исходные токи сохраняют абсолютный уровень сигнала, что позволяет сети различать конфигурации установки.

Во-вторых, масштабирование является необходимым условием: без него вектор *feats*8 показывает результат хуже, чем четыре исходных тока (0,914 мм против 0,776 мм). Фототоки имеют порядок десятков–сотен единиц АЦП, нормированные значения – порядок 0,1–1; при общем шаге обучения крупномасштабные компоненты доминируют в градиенте, и информация нормированных признаков не используется. Центрирование, не устраняющее различий масштаба, ожидаемо не помогает.

В-третьих, отбеливание снижает ошибку еще на 10–20 % по сравнению со стандартизацией (с 0,057 мм до 0,045 мм для *feats*8); *PCA*- и *ZCA*-варианты статистически неразличимы. Добавление суммарной амплитуды S (*feats*9) улучшения не дает, поскольку S линейно выражается через исходные токи.

Для дальнейших экспериментов выбран на-

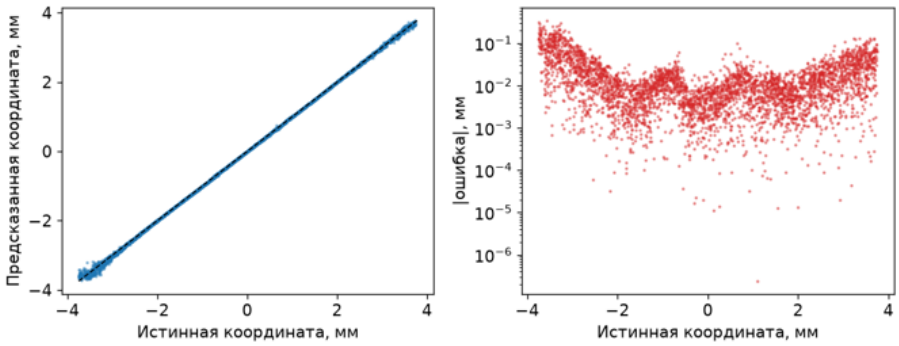


Рис. 1. Предсказанная координата (слева) и абсолютная ошибка (справа, логарифмическая шкала) в зависимости от истинной координаты для лучшей конфигурации

Таблица 2. Спектральные характеристики ковариационной матрицы признаков

Признаки	Преобразование	Эффективный ранг	κ информативного подпространства
*raw*4	Без преобр. / стандартизация	4/4	$2{,}8 \cdot 10^3$
*raw*4	*PCA*-отбеливание	4/4	1
*feats*8	Без преобразования	4/8	$2{,}8 \cdot 10^3$
*feats*8	Стандартизация	7/8	$1{,}5 \cdot 10^4$
*feats*8	Стандартизация + *PCA*-отбеливание	7/8	1

бор *feats*8 с *PCA*-отбеливанием.

Ошибка минимальна в центральной области и возрастает к краям диапазона (рис. 1), где пятно частично выходит за пределы фоточувствительной области и информативность сигналов падает, – это согласуется с известным поведением КД на границе линейного участка характеристики [4; 6].

3.2. Обусловленность задачи оптимизации и интерпретация результатов.

Наблюдаемые эффекты допускают количественное объяснение. Для линейной модели с квадратичной функцией потерь матрица Гессе совпадает с ковариационной матрицей входов Σ, и скорость сходимости градиентного спуска определяется ее числом обусловленности $\kappa(\Sigma) = \lambda_{max}/\lambda_{min}$ [15]; первый слой перцептрона наследует эту чувствительность. В табл. 2 приведены эффективный ранг (число направлений с $\lambda_j > 10^{-6}\lambda_{max}$) и κ информативного подпространства для обучающей выборки.

Табл. 2 объясняет результаты табл. 1. Без преобразования дисперсии нормированных признаков на шесть порядков меньше дисперсий фототоков, поэтому все четыре соответствующих направления ниже порога $10^{-6}\lambda_{max}$: эффективный ранг входа равен 4 из 8, нормированные признаки численно неразличимы для обучения, и *feats*8 фактически вырождается в *raw*4 – что и наблюдается в первой колонке табл. 1. Стандартизация восстанавливает ранг до 7 (восьмое направление вырождено точно: $A/S + B/S + C/S + D/S \equiv 1$), однако корреляции признаков сохраняют $\kappa \sim 10^4$; отбеливание по корреляционной матрице приводит информативное подпространство к $\kappa = 1$. Для *raw*4 стандартизация почти не меняет κ (масштабы квадрантов близки), и ее выигрыш связан с согласованием масштаба входов с инициализацией и шагом обучения; выигрыш отбеливания (с 0,164 до 0,136 мм) обусловлен устранением корреляций.

3.3. Влияние алгоритма оптимизации.

Чтобы отделить вклад преобразования данных от адаптивности оптимизатора, серия раздела 3.1 повторена для стохастического градиентного спуска (***SGD***) с моментом 0,9 и без него (шаг 0,01, набор *feats*8). Без масштабирования *SGD* расходится, тогда как *Adam* сходится, хотя

Таблица 3. Метрики на тестовой выборке для различных архитектур: 800 эпох, среднее ± 95 % ДИ по пяти запускам. *MLP* – на *feats*8 + *PCA*-отбеливание, *RBF* и *MLP*-1 (станд.) – на стандартизации

Модель	Параметров, тыс.	*MAE*, мм	*MedAE*, мм	*RMSE*, мм	*MaxAE*, мм
MLP-1	0,6	0,0335 ± 0,0014	0,0225 ± 0,0017	0,0557 ± 0,0005	1,775 ± 0,036
MLP-2	4,8	0,0220 ± 0,0007	0,0119 ± 0,0009	0,0384 ± 0,0007	0,524 ± 0,282
MLP-4	13,1	0,0192 ± 0,0007	0,0092 ± 0,0006	0,0359 ± 0,0007	0,344 ± 0,016
MLP-6	21,4	0,0203 ± 0,0016	0,0097 ± 0,0013	0,0373 ± 0,0015	0,354 ± 0,049
MLP-4-*res*	13,1	0,0200 ± 0,0006	0,0099 ± 0,0006	0,0367 ± 0,0012	0,458 ± 0,193
MLP-1 (станд.)	0,6	0,0402 ± 0,0043	0,0300 ± 0,0046	0,0603 ± 0,0039	1,672 ± 0,031
MLP-4 (станд.)	13,1	0,0204 ± 0,0013	0,0107 ± 0,0014	0,0368 ± 0,0012	0,378 ± 0,032
CNN-M (станд.)	22,9	0,0210 ± 0,0008	0,0114 ± 0,0009	0,0370 ± 0,0002	0,353 ± 0,020
CNN-L (станд.)	90,9	0,0204 ± 0,0010	0,0107 ± 0,0010	0,0371 ± 0,0020	0,382 ± 0,040
RBF-64 (станд.)	0,6	0,0390 ± 0,0029	0,0245 ± 0,0023	0,0658 ± 0,0057	1,380 ± 0,448
RBF-128 (станд.)	1,3	0,0371 ± 0,0014	0,0239 ± 0,0012	0,0619 ± 0,0016	1,140 ± 0,078
RBF-256 (станд.)	2,6	0,0360 ± 0,0028	0,0234 ± 0,0025	0,0572 ± 0,0034	1,119 ± 0,117

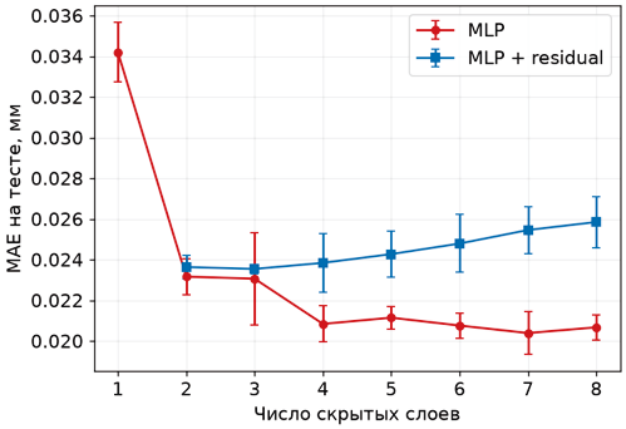


Рис. 2. Зависимость *MAE* от глубины перцептрона: обычный *MLP* (красные точки) и *MLP* с остаточными связями (синие). Планки – стандартное отклонение по запускам

и к существенно худшему решению (0,914 мм): адаптивные масштабы шага частично играют роль масштабирования данных. На стандартизованных данных *SGD* с моментом почти достигает уровня *Adam* (0,066 против 0,057 мм), однако *PCA*-отбеливание для *SGD* вредно (0,108 против 0,045 мм у *Adam*) – «сжатые» отбеливанием направления нормированных признаков получают малые градиенты, и неадаптивный метод их фактически игнорирует. Таким образом, адаптивный оптимизатор не отменяет преобразования данных (без масштабирования качество деградирует на порядок даже для *Adam*), но снижает чувствительность к его выбору; при неадаптивной оптимизации предпочтительна стандартизация.

4. Влияние архитектуры модели

4.1. Глубина перцептрона, остаточные свя-

зи и альтернативные архитектуры.

Во второй серии экспериментов набор признаков и преобразование были зафиксированы (*feats*8, *PCA*-отбеливание), варьировалась архитектура. Результаты приведены в табл. 3 и на рис. 2.

Увеличение глубины с одного до четырех слоев снижает *MAE* в 1,7 раза (с 0,0335 мм до 0,0192 мм), медианную ошибку – в 2,4 раза, максимальную – в 5 раз (с 1,78 мм до 0,34 мм: глубокая сеть лучше описывает краевые области); дальнейший рост глубины улучшения не дает – зависимость выходит на плато (рис. 2).

Остаточные связи на всех исследованных глубинах дают небольшое, но систематическое ухудшение (рис. 2). Это не противоречит [12]: остаточные связи решают проблему деградации градиента в сетях из десятков слоев, тогда как при глубине 2–8 и ширине 64 такой проблемы нет, а тождественная связь ограничивает класс реализуемых слоем преобразований.

Одномерная сверточная сеть при одинаковом преобразовании достигает уровня глубокого перцептрона (0,0204 мм у *CNN-L* против 0,0204 мм у *MLP*-4 на стандартизации), но требует в семь раз большего числа параметров и не превосходит перцептрон с отбеливанием (0,0192 мм): при четырех квадрантах рецептивное поле второго слоя покрывает весь «сигнал». Увеличение числа базисных функций *RBF*-сети с 64 до 256 дает лишь умеренное улучшение (с 0,0390 до 0,0360 мм).

4.2. Взаимодействие преобразования данных и типа модели.

RBF-сеть на стандартизованных данных превосходит однослойный перцептрон (0,0371 мм против 0,0402 мм), что согласуется с [9], однако на отбеленных данных ее ошибка возрастает более чем вдвое (до 0,10–0,12 мм), тогда как перцептрон от отбеливания только выигрывает.

Причина в структуре *feats*8: нормированные компоненты связаны соотношением $A/S + B/S + C/S + D/S = 1$, поэтому ковариационная матрица имеет почти нулевые собственные числа ($\lambda_{min}/\lambda_{max}$ достигало 10^{-18}). Отбеливание масштабирует направления пропорционально $\lambda_j^{-1/2}$, растягивая вырожденные, содержащие лишь численный шум, на порядки. Перцептрону это безвредно (обучение занижает веса шумовых входов), но для *RBF*-сети, отклик которой определяется евклидовым расстоянием до центров, растянутые шумовые направления доминируют в расстояниях и разрушают локальную структуру приближения; пол на собственные числа ($\lambda_j \geq 10–6\lambda_{max}$) смягчает эффект, но не устраняет его.

Практический вывод состоит в том, что преобразование данных следует выбирать с учетом типа модели: для моделей на основе скалярных произведений (перцептроны) оптимально отбеливание, для дистанционных (*RBF*) – стандартизация; вектор с линейно зависимыми компонентами требует регуляризованного отбеливания либо исключения зависимых компонент.

Заключение

На экспериментальном наборе из 79 200 наблюдений квадрантного фотодетектора систематически исследовано влияние состава признаков, преобразования данных и архитектуры нейросетевой модели на точность определения координаты светового пятна. Основные результаты следующие.

1. Объединение исходных и нормированных фототоков снижает среднюю абсолютную ошибку примерно втрое, но только при условии масштабирования: без него расширенный вектор уступает даже исходным токам.

2. Отбеливание входов дает дополнительное снижение ошибки перцептрона на 10–20 % по сравнению со стандартизацией.

3. Увеличение глубины перцептрона с одного до четырех слоев снижает среднюю ошибку в 1,7 раза с выходом на плато; остаточные связи систематически не полезны, а сверточная сеть достигает уровня глубокого перцептрона, но не превосходит его.

4. Адаптивный оптимизатор не заменяет преобразование данных: без масштабирования *SGD* расходится, а *Adam* сходится к решению, на порядок худшему; при неадаптивной оптимизации выбор преобразования критичен.

5. Обнаружено взаимодействие «преобразование × модель»: отбеливание, оптимальное для перцептрона, более чем вдвое ухудшает *RBF*-сеть из-за почти вырожденных направлений, порождаемых линейной зависимостью нормированных компонент; на стандартизации *RBF*-сеть превосходит однослойный перцептрон.

Лучшая конфигурация – четырехслойный

перцептрон с *PCA*-отбеливанием – достигает *MAE* = 0,019 мм (19 мкм) в диапазоне ±3,75 мм, что примерно в семь раз точнее лучшей конфигурации на исходных фототоках. Результаты применимы при проектировании систем позиционирования на основе квадрантных фотодетекторов, в том числе систем наведения терминалов оптической связи.

Список литературы/References

1. Mäkynen, A. Position-sensitive devices and sensor systems for optical tracking and displacement sensing applications / A. Mäkynen. – Oulu : University of Oulu, 2000. – 121 p.
2. Zhang, Z. A new laser displacement sensor based on triangulation for gauge real-time measurement / Z. Zhang, Q. Feng, Z. Gao [и др.] // Optics & Laser Technology. – 2008. – No. 40. – P. 252–255.
3. Feng, Q. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module / Q. Feng, B. Zhang, C. Kuang // Optics & Laser Technology. – 2004. – No. 36. – P. 279–283.
4. Manojlović, L.M. Quadrant photodetector sensitivity / L.M. Manojlović // Applied Optics. – 2011. – No. 50. – P. 3461–3469.
5. Zhang, J. Quadrant response model and error analysis of four-quadrant detectors related to the non-uniform spot and blind area / J. Zhang, W. Qian, G. Gu [и др.] // Applied Optics. – 2018. – No. 57. – P. 6898–6905.
6. Chen, M. Investigation of positioning algorithm and method for increasing the linear measurement range for four-quadrant detector / M. Chen, Y. Yang, X. Jia, H. Gao // Optik. – 2013. – No. 124. – P. 6806–6809.
7. Wu, J. Improved measurement accuracy of spot position on an InGaAs quadrant detector / J. Wu, Y. Chen, S. Gao, Y. Li, Z. Wu // Applied Optics. – 2015. – No. 54. – P. 8049–8054.
8. Li, Q. A New Response Approximation Model of the Quadrant Detector using the Optimized BP Neural Network / Q. Li, J. Wu, Y. Chen [и др.] // IEEE Sensors Journal. – 2020. – No. 20. – P. 4345–4352.
9. Wang, X. Method to Improve the Detection Accuracy of Quadrant Detector Based on Neural Network / X. Wang, X. Su, G. Liu [и др.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2021. – No. 33. – P. 1254–1257.
10. Nair, V. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines / V. Nair, G.E. Hinton // Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-10). – 2010. – P. 807–814.
11. He, K. Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2015. – P. 1026–1034.
12. He, K. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 770–778.
13. Broomhead, D.S. Multivariable functional interpolation and adaptive networks / D.S. Broomhead, D. Lowe // Complex Systems. – 1988. – Vol. 2. – P. 321–355.
14. Kingma, D.P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D.P. Kingma, J. Ba // 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2015.

© Н.К. Казаков, Н.А. Ивлиев, 2026

УДК 004.043

А.В. КОСТИНЕВИЧ, В.В. КОСТИНЕВИЧ
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА СЛУЧАЙНОГО ЛЕСА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Ключевые слова: балансировка весов; дисбаланс классов; машинное обучение; охрана труда; производственный травматизм; прогнозирование рисков; случайный лес; синтетические данные.

Аннотация. Цель исследования заключается в оценке эффективности модели прогнозирования рисков производственного травматизма на основе алгоритма случайного леса в условиях дисбаланса классов. Для достижения поставленной цели на основе синтетических данных исследовано влияние различных производственных и человеческих факторов на уровень риска, проведены вычислительные эксперименты с использованием механизма балансировки весов классов и выполнен анализ метрик качества классификации. Гипотеза исследования состоит в том, что использование сбалансированных весов классов при обучении модели позволяет снизить число пропущенных опасных инцидентов при сохранении практически приемлемого уровня ложных срабатываний. По результатам вычислительного эксперимента установлена высокая чувствительность модели к рискам травматизма и хорошая разделяющая способность. Ключевыми предикторами опасных ситуаций в рамках построенной модели выступили износ оборудования и класс вредности условий труда. Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу и обосновывают применимость разработанного подхода для построения прототипов систем поддержки принятия решений в сфере охраны труда.

Обеспечение безопасности сотрудников на производстве и минимизация рисков травматизма остаются одними из ключевых приоритетов для промышленных предприятий. Долгое время подход к управлению охраной труда носил преимущественно опосредованный характер, при котором корректирующие меры принимались по факту совершения инцидентов. Однако в условиях современной индустрии, характеризующейся усложнением технологических процессов и ростом объемов собираемых данных, возрастает потребность в переходе к превентивным методам управления – предупреждению происшествий на основе предиктивной аналитики [1].

Решение данной задачи связано с разработкой и внедрением специализированных систем поддержки принятия решений (**СППР**), функциональные возможности которых могут быть существенно расширены за счет применения алгоритмов машинного обучения. Таким образом, интеграция предиктивных моделей в архитектуру СППР позволяет перейти от анализа архивных данных к динамическому прогнозированию в близком к реальному времени режиме за счет способности алгоритмов машинного обучения адаптироваться к изменяющейся производственной среде и выявлять сложные нелинейные зависимости между разнородными факторами [1]. Это дает возможность оценивать совокупный эффект от накопления мелких отклонений, которые по отдельности могли бы не классифицироваться как серьезные угрозы.

Для практической реализации описанного подхода предложена математическая модель бинарной классификации на основе алгоритма «случайного леса», которая может функционировать в качестве расчетного ядра для перспективных СППР.

Метод случайного леса представляет собой алгоритм ансамблевого машинного обучения, основанный на построении совокупности независимых решающих деревьев. Процесс обучения ансамбля базируется на двух ключевых

концепциях: бэггинге и методе случайных подпространств. Бэггинг заключается в обучении каждого дерева на индивидуальной случайной подвыборке. Такие подвыборки формируются методом бутстрап-выборки – случайным извлечением строк из исходной таблицы с возвращением. В результате такого отбора некоторые записи дублируются, а некоторые исключаются, благодаря чему каждое дерево получает уникальный набор данных и обучается независимо от остальных. Метод случайных подпространств состоит в выборе случайного подмножества признаков (факторов риска) на каждом этапе разветвления в процессе построения дерева. В результате деревья ансамбля отличаются друг от друга структурой и используемыми признаками, что снижает корреляцию между их прогнозами и повышает устойчивость модели. Финальное классификационное решение принимается путем мажоритарного голосования всей совокупности деревьев ансамбля [2]. Для обеспечения высокой обобщающей способности модели и предотвращения переобучения на зашумленных данных структура деревьев параметрически ограничивается: в частности, фиксируется максимальная глубина ветвления и задается минимальное число объектов в терминальных листах, что позволяет нивелировать аномалии в обучающей выборке [2].

Поскольку в рамках предложенной модели прогнозирование рисков производственного травматизма формулируется как задача бинарной классификации (наличие или отсутствие факта травматизма), целевая переменная разделяется на два класса:

– класс «0»: безопасное течение рабочего процесса, отсутствие травм;

– класс «1»: возникновение случая травматизма в ходе рабочей смены.

Специфика предметной области обусловливает выраженный дисбаланс классов: безопасные производственные смены составляют большинство наблюдений, тогда как случаи производственного травматизма являются относительно редкими событиями. В подобных условиях модель может смещаться в сторону мажоритарного класса, что приводит к увеличению числа пропущенных опасных ситуаций. Для компенсации данного эффекта при обучении классификатора применяется механизм взвешивания классов, который увеличивает значимость ошибок при распознавании миноритарного класса [2]. Это позволяет повысить полноту выявления потенциально опасных ситуаций и снизить вероятность пропуска случаев производственного травматизма.

Входной вектор признаков классификатора включает совокупность параметров, упорядоченных в соответствии с оценками их важности, полученными в результате обучения модели:

– возраст оборудования (лет): характеризует степень физического износа оборудования; увеличение срока эксплуатации может сопровождаться ростом вероятности технических отказов и неисправностей защитных систем [1];

– класс вредности условий труда: отражает уровень неблагоприятного воздействия производственной среды и характеризует исходный уровень профессионального риска [1];

– давность инструктажа (месяцев после обучения): характеризует актуальность знаний работников в области охраны труда; увеличение периода после обучения может сопровождаться снижением внимания к требованиям безопасности [1];

– длительность смены (часов): отражает продолжительность непрерывной трудовой деятельности; увеличение времени работы способствует накоплению физической и когнитивной усталости [1];

– профессиональный стаж (лет): характеризует уровень практического опыта и сформированность навыков безопасного выполнения производственных операций [1];

– возраст сотрудника (лет): отражает совокупное влияние физиологических особенностей и накопленного профессионального опыта на вероятность возникновения опасных ситуаций;

– температура производственной среды (^oC): характеризует параметры микроклимата; отклонение температуры от рекомендуемых значений может приводить к дополнительной физиологической нагрузке на работника.

В результате обучения такая модель обеспечивает получение двух типов результатов:

– оценка вероятности событий: для каждого нового набора параметров (вектора признаков смены) модель вычисляет вероятность принадлежности объекта к классу «1» (вероятность наступления травмы); эта числовая оценка, варьирующаяся от нуля до единицы, может интерпретироваться как количественная мера угрозы;

– анализ значимости факторов: алгоритм

Таблица 1. Метрики качества классификации моделей рисков

Класс	Точность	Полнота	*F*1-мера	Объем выборки
Класс «0» (нет травмы)	0,98	0,81	0,89	5400
Класс «1» (травма)	0,33	0,85	0,48	600
Общая точность	–	–	0,81	6 000
Площадь под *ROC*-кривой	–	–	0,8991	–

позволяет ранжировать используемые признаки по степени их вклада в построение прогноза, что помогает выявить наиболее критичные направления для разработки общих превентивных мер в области безопасности.

Для оценки эффективности предложенной модели классификации сформирован набор синтетических данных общим объемом 20 000 строк, сгенерированных случайным образом по заданным вероятностным законам для имитации реальных производственных условий. Для обучения и последующего тестирования алгоритма выборка была разделена в соотношении 70 % на 30 %, при этом объем тестового множества составил 6 000 наблюдений.

Оценка качества прогнозирования осуществлялась с использованием стандартного набора метрик для несбалансированных данных: точности (доля объектов оцениваемого класса, верно определенных моделью, среди всех объектов, отнесенных к этому классу), полноты (доля успешно обнаруженных объектов оцениваемого класса среди всех фактически существовавших объектов этого класса), *F*1-меры (сбалансированный показатель, объединяющий точность и полноту конкретного класса в единую метрику), общей точности (доля всех верных предсказаний от общего объема тестовых данных) и площади под *ROC*-кривой (показатель способности алгоритма различать классы вне зависимости от порога принятия решений) [2]. Полученные в ходе тестирования результаты представлены в табл. 1.

Из приведенных значений метрик видно, что модель обладает высокой чувствительностью к редким событиям производственного травматизма: полнота для класса «1» составляет 0,85. Это означает, что алгоритм успешно выявляет 85 % смен, завершившихся травматизмом. Для систем поддержки принятия решений в области охраны труда данный показатель имеет приоритетное значение, поскольку позволяет минимизировать число пропущенных опасных ситуаций. Низкое значение точности для класса «1» (0,33) обусловлено применением механизма балансировки классов при обучении модели, вследствие чего классификатор демонстрирует повышенную чувствительность к миноритарному классу, сопровождающуюся увеличением числа ложноположительных прогнозов (ложных тревог), при которых модель ошибочно относит безопасные смены к категории опасных. Высокая разделяющая способность модели подтверждается значением площади под *ROC*-кривой, равным 0,8991.

Детальный анализ структуры прогнозов с использованием матрицы ошибок свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода в рамках проведенного вычислительного эксперимента. Из общего числа безопасных смен модель корректно классифицировала 4 357 случаев (истинно отрицательные исходы), при этом число ложноположительных прогнозов (ложных тревог) составило 1 043. В группе смен, завершившихся травматизмом, алгоритм успешно выявил 512 случаев (истинно положительные исходы), допустив лишь 88 пропусков (ложноотрицательных исходов). Таким образом, число корректно выявленных случаев травматизма почти в шесть раз превышает число пропущенных инцидентов, что свидетельствует о высокой чувствительности модели к редким опасным событиям и подтверждает целесообразность применения механизма балансировки классов для минимизации наиболее критичных ошибок классификации.

Поскольку исходный массив данных формировался на основе заданных вероятностных зависимостей, алгоритм случайного леса использовался для оценки относительной важности признаков на основе суммарного снижения неоднородности при расщеплении узлов реша-

ющих деревьев. Полученные оценки не отражают причинно-следственные зависимости или коэффициенты исходной функции риска, однако позволяют определить относительную важность признаков в процессе построения модели.

По результатам анализа получено следующее ранжирование признаков:

– возраст оборудования – 30,8 %;
– класс вредности условий труда – 25,0 %;
– давность инструктажа – 15,0 %;
– длительность смены – 13,5 %;
– профессиональный стаж – 8,1 %;
– возраст сотрудника – 4,2 %;
– температура производственной среды – 3,4 %.

Представленные значения отражают относительную важность признаков при построении ансамбля решающих деревьев. Полученное распределение качественно согласуется со структурой зависимостей, заложенной при генерации синтетических данных. На техногенные и средовые факторы (возраст оборудования и класс вредности условий труда) приходится 55,8 % суммарной относительной важности признаков, рассчитанной на основе снижения неоднородности при расщеплении узлов деревьев. Это свидетельствует о том, что именно указанные признаки вносят наибольший вклад в формирование классификационных решений модели.

Результаты вычислительного эксперимента свидетельствуют о перспективности применения алгоритма случайного леса для прогнозирования рисков производственного травматизма. Благодаря способности эффективно обрабатывать разнородные признаки (как числовые, так и категориальные) без предварительной нормализации данных алгоритм может служить основой математической модели при решении задач прогнозирования в сфере охраны труда [2].

Применение механизма балансировки классов является важным условием использования модели в условиях выраженного дисбаланса данных. Достигнутый уровень полноты позволяет существенно сократить число пропущенных опасных ситуаций, тогда как увеличение количества ложноположительных прогнозов представляет собой приемлемый компромисс с точки зрения обеспечения безопасности персонала [1]. Высокое значение площади под *ROC*-кривой свидетельствует о хорошей разделяющей способности модели и подтверждает перспективность использования предложенного подхода при разработке систем поддержки принятия решений в области охраны труда.

Список литературы

1. Елин, А.М. Охрана труда: принципы и методы управленческого воздействия : монография / А.М. Елин. – Тамбов : Консалтинговая компания Юком, 2021. – 260 с.
2. Жерон, О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем / О. Жерон ; пер. с англ. – СПб. : ООО «Альфа-книга», 2018. – 688 с. : ил. – Парал. тит. англ.

References

1. Yelin, A.M. Okhrana truda: printsipy i metody upravlencheskogo vozdeystviya : monografiya / A.M. Yelin. – Tambov : Konsaltingovaya kompaniya Yukom, 2021. – 260 s.
2. Zheron, O. Prikladnoye mashinnoye obucheniye s pomoshch'yu Scikit-Learn i TensorFlow: kontseptsii, instrumenty i tekhniki dlya sozdaniya intellektual'nykh sistem / O. Zheron ; per. s angl. – SPb. : OOO «Al'fa-kniga», 2018. – 688 s. : il. – Paral. tit. angl.

© А.В. Костиневич, В.В. Костиневич, 2026

УДК 004.043

А.В. КОСТИНЕВИЧ, В.В. КОСТИНЕВИЧ
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПАРОСОЧЕТАНИЙ В НЕВЗВЕШЕННОМ ДВУДОЛЬНОМ ГРАФЕ

Ключевые слова: алгоритм Куна; алгоритм Хопкрофта – Карпа; двудольный граф; максимальное паросочетание; обход в глубину; обход в ширину; поиск увеличивающихся путей; сравнение эффективности алгоритмов.

Аннотация. Цель исследования заключается в сравнительном анализе времени выполнения и эффективности алгоритмов Куна и Хопкрофта – Карпа при построении максимальных паросочетаний в невзвешенных двудольных графах различных размеров. Для достижения поставленной цели исследованы принципы работы указанных алгоритмов, проведены вычислительные эксперименты и выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Гипотеза исследования состоит в том, что эффективность алгоритмов определяется размером графа: алгоритм Куна является более эффективным для графов небольшого размера, тогда как алгоритм Хопкрофта – Карпа обладает преимуществом при обработке крупных графов. В работе применены методы теоретического анализа, вычислительного эксперимента, сравнительного анализа и обработки экспериментальных данных. По результатам исследования установлено, что алгоритм Куна обеспечивает меньшее время выполнения на малых графах, тогда как алгоритм Хопкрофта – Карпа демонстрирует более высокую производительность на графах большого размера. Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу и позволяют определить области рационального применения рассматриваемых алгоритмов.

При анализе и моделировании сложных систем часто возникает необходимость описать взаимосвязи между двумя принципиально разными группами объектов. Особенностью таких систем является то, что связи существуют исключительно между представителями разных групп, тогда как внутренние взаимодействия внутри одной группы отсутствуют или не имеют значения для решаемой задачи. Для математического представления подобных структур в теории графов используется специальный класс моделей – двудольные графы.

Двудольным называется граф, множество вершин которого может быть разбито на два непересекающихся подмножества таким образом, что каждое ребро соединяет вершину из первого подмножества с вершиной из второго. Внутри самих подмножеств, или долей графа, связи отсутствуют.

Одним из основных свойств двудольных графов является отсутствие циклов нечетной длины. Благодаря этому свойству существенно упрощается решение ряда задач теории графов, в частности задачи поиска паросочетания. Паросочетанием называется множество ребер графа, не имеющих общих вершин. Это означает, что каждая вершина графа соприкасается (инцидентна) не более чем с одним ребром, входящим в паросочетание. Вершины, которые соединены ребрами из выбранного паросочетания, называются насыщенными, остальные – свободными [1].

В прикладных задачах наиболее часто требуется построить максимальное паросочетание, то есть такое множество ребер, которое содержит максимально возможное число попарно несмежных ребер для данного графа. Для решения этой задачи применяются различные вычислительные методы, среди которых наиболее известными и широко используемыми являются алгоритм Куна и алгоритм Хопкрофта – Карпа [1; 2].

Теоретическим фундаментом для обоих

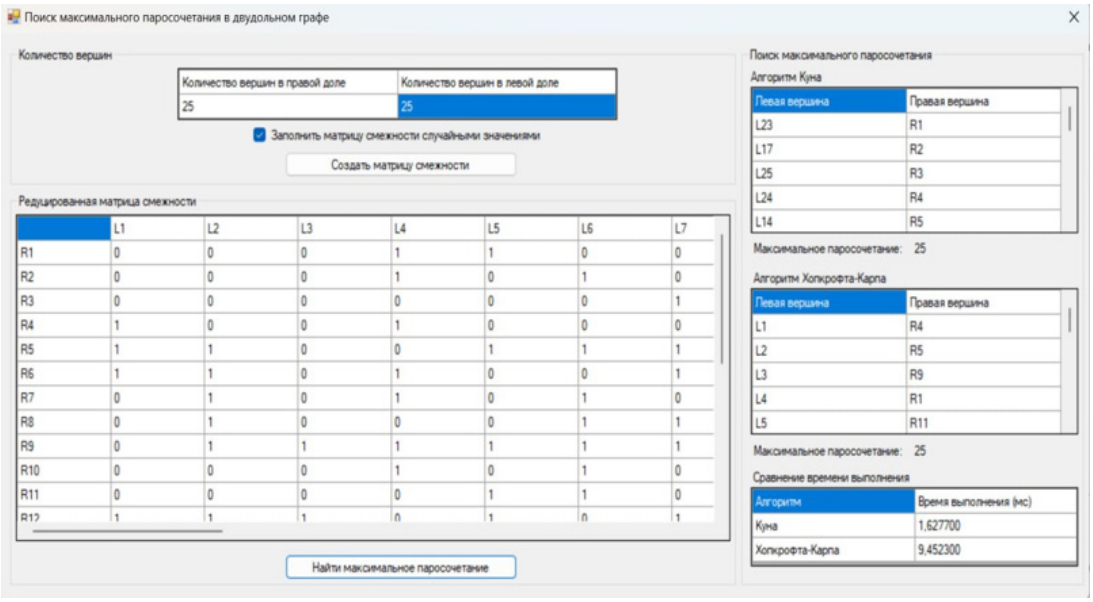


Рис. 1. Пользовательский интерфейс разработанного приложения

рассматриваемых методов является теорема Бержа, сформулированная в 1957 г. Она определяет необходимый и достаточный критерий максимальности сопоставления: паросочетание M в графе G является максимальным тогда и только тогда, когда в этом графе отсутствует увеличивающий путь относительно M. Увеличивающим называется простой путь, начальная и конечная вершины которого свободны (не входят в текущее паросочетание M), а ребра поочередно принадлежат и не принадлежат множеству M. Согласно теореме, если такой путь обнаружен, то операция симметрической разности множеств ребер пути и текущего паросочетания позволяет построить новое паросочетание, мощность которого ровно на единицу больше предыдущего. Таким образом, общая схема решения задачи сводится к последовательному поиску и исключению таких путей, что и реализуется в рассматриваемых алгоритмах.

Суть алгоритма Куна заключается в последовательном поиске увеличивающих путей для каждой вершины левой доли двудольного графа с помощью обхода в глубину. В процессе работы алгоритм хранит текущее состояние паросочетания. При запуске поиска из очередной вершины левой доли рассматриваются ее смежные вершины в правой доле. Если среди них находится свободная вершина, она включается в паросочетание с исходной вершиной. В противном случае алгоритм рекурсивно пытается найти альтернативную свободную вершину для вершины, уже связанной с данной правой вершиной. Во избежание зацикливания при каждом запуске поиска фиксируются уже посещенные вершины. При успешном нахождении увеличивающего пути происходит чередование ребер вдоль этого пути, что увеличивает мощность паросочетания на единицу. Максимальное паросочетание считается построенным после завершения попыток его расширения из всех вершин левой доли графа [2].

В основе функционирования алгоритма Хопкрофта – Карпа лежит итерационный принцип разбиения вычислительного процесса на отдельные фазы, в каждой из которых осуществляется одновременное нахождение и расширение множества кратчайших увеличивающих путей. Реализация каждой фазы базируется на совместном использовании поиска в ширину и поиска в глубину. Поиск в ширину, запускаемый из множества свободных вершин левой доли, формирует вспомогательную слоистую структуру графа с фиксацией расстояний до вершин правой доли. Поиск в глубину, ограниченный построенными уровнями слоистой структуры, обеспечивает выделение максимального набора взаимно непересекающихся увеличивающих путей минимальной длины. Нахождение каждого такого пути сопровождается чередованием ребер и модификацией текущего паросочетания. Итерационный процесс продол-

Таблица 1. Метрики качества классификации моделей рисков

Количество вершин в левой доле	Количество вершин в правой доле	Общее количество вершин	Время выполнения алгоритма Куна (мс)	Время выполнения алгоритма Хопкрофта – Карпа (мс)
5	5	10	0,001700	0,004300
10	10	20	0,004200	0,007000
15	15	30	0,0064	0,007
20	20	40	0,017900	0,010900
50	50	100	0,249400	0,042300
100	100	200	1,457400	0,081200
200	200	400	12,3693	0,2293
300	300	600	50,0033	0,637
400	400	800	115,863700	0,851100
500	500	1000	199,601000	1,348500

жается до тех пор, пока поиск в ширину позволяет построить слоистую структуру, содержащую увеличивающие пути; при невозможности их дальнейшего обнаружения максимальное паросочетание считается построенным [2].

Теоретическая вычислительная сложность алгоритма Куна составляет $O(EV)$, а алгоритма Хопкрофта – Карпа – $O(E\sqrt{V})$, где E – количество ребер графа, V – количество вершин в графе [2]. Несмотря на это, нельзя однозначно утверждать о превосходстве одного алгоритма над другим, поскольку асимптотическая оценка описывает поведение алгоритмов при стремлении параметров графа к бесконечности и не учитывает постоянную составляющую времени выполнения. В связи с этим возникает необходимость экспериментального и практического сравнения данных алгоритмов на графах различного размера с целью выявления их реальной эффективности в конкретных условиях.

Для решения поставленной задачи была разработана программа, позволяющая выполнить сравнение времени выполнения алгоритмов Куна и Хопкрофта – Карпа на двудольных графах разного размера. Пользовательский интерфейс приложения приведен на рис. 1.

С использованием разработанного программного обеспечения была проведена серия вычислительных экспериментов. В ходе тестирования для каждого фиксированного размера двудольного графа (в диапазоне от 10 до 1 000 вершин, при этом количество вершин в левой доле равнялось количеству вершин в правой) генерировались случайные ребра, после чего измерялось точное время работы каждого из сопоставляемых алгоритмов.

Результаты проведенных измерений были систематизированы и представлены в табличном и графическом виде.

В табл. 1 приведены результаты проведенных измерений.

На рис. 2 приведена полученная зависимость времени выполнения алгоритмов Куна и Хопкрофта – Карпа от общего количества вершин графа. Для обеспечения наглядности при сопоставлении существенно различающихся порядков величин ось ординат (время выполнения) представлена в логарифмическом масштабе.

Из графика видно, что алгоритм Куна обеспечивает меньшее время выполнения на малых графах (менее 30 вершин), что объясняется его простой структурой и отсутствием значительных накладных расходов на инициализацию вспомогательных структур данных. В диапазоне 30–40 вершин наблюдается точка пересечения графиков, что связано с ростом числа рекурсивных обходов в алгоритме Куна и одновременной компенсацией первоначальных затрат алгоритма Хопкрофта – Карпа за счет более эффективной организации поиска увеличивающих путей. При дальнейшем уве-

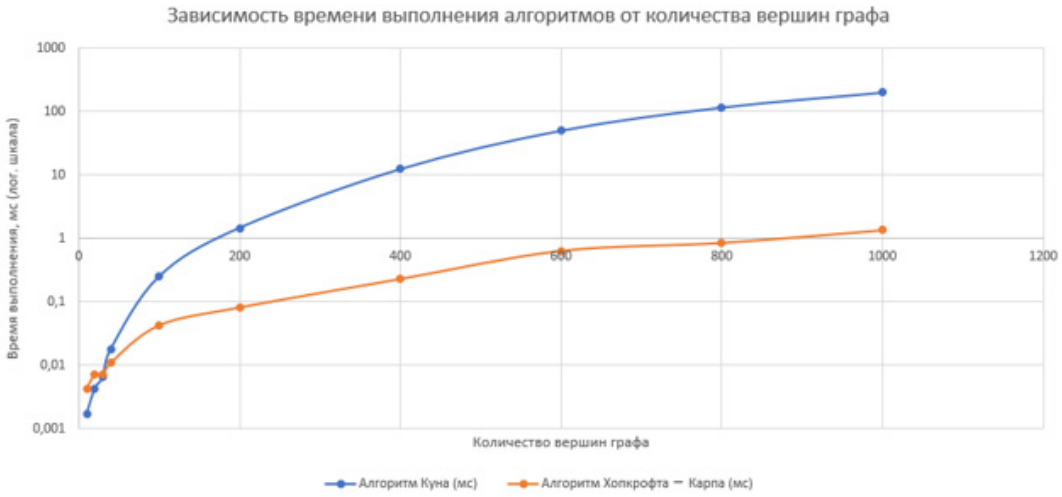


Рис. 2. Зависимость времени выполнения алгоритмов от количества вершин графа

личении размера графа алгоритм Хопкрофта – Карпа демонстрирует существенно более высокую производительность (вплоть до более чем 140-кратного ускорения при 1 000 вершинах), что обусловлено поиском множества кратчайших увеличивающих путей за одну фазу с использованием поиска в ширину и в глубину, тогда как алгоритм Куна выполняет последовательные обходы для каждой вершины левой доли, что приводит к увеличению общего числа вычислительных операций.

Таким образом, практический выбор конкретного метода определяется масштабом обрабатываемых данных и системными требованиями к программному обеспечению. Использование алгоритма Куна наиболее целесообразно при решении локальных задач малой размерности, а также в средах с ограниченными ресурсами, где приоритетными являются простота реализации и минимальный объем занимаемой памяти. В свою очередь, алгоритм Хопкрофта – Карпа выступает оптимальным решением для оперирующих графами средней и большой размерности систем, приоритетом для которых является минимизация времени выполнения расчетов.

В заключение отметим, что структурные особенности алгоритма Куна – минимальное потребление оперативной памяти и отсутствие необходимости в инициализации сложных вспомогательных структур – делают его применимым в системах с ограниченными аппаратными ресурсами. К таким системам относятся встроенные устройства, микроконтроллеры и узлы так называемого интернета вещей. В подобных модулях объем доступной памяти жестко лимитирован, а размерность локальных задач (например, распределение сигналов между датчиками или выбор маршрутов в локальных сенсорных сетях) обычно не превышает порог в 30–40 вершин. Использование алгоритма Хопкрофта – Карпа в таких условиях нецелесообразно, так как накладные расходы на построение слоистой структуры и организацию очередей не компенсируются сокращением времени вычислений.

Соответственно, высокая производительность алгоритма Хопкрофта – Карпа на графах средней и большой размерности востребована в крупномасштабных распределенных информационных системах и облачных платформах. Типичным примером является планирование ресурсов в облачных вычислениях, где требуется оперативно сопоставлять входящие запросы на виртуальные машины с доступными физическими серверами (хостами). В таких системах количество элементов может исчисляться сотнями и тысячами, а пересчет матрицы распределения должен происходить за минимальное время. Способность алгоритма Хопкрофта – Карпа быстро находить сопоставления на больших графах позволяет использовать его в качестве ядра динамических планировщиков задач высокой плотности.

Результаты исследования актуальны для проектирования телекоммуникационного оборудования, в частности систем бесконфликтной коммутации пакетов в сетевых маршрутиза-

торах. Выбор конкретного метода здесь определяется классом устройства: для локальных абонентских маршрутизаторов с малым числом портов достаточным является применение алгоритма Куна, тогда как для магистральных промышленных коммутаторов с высокой плотностью портов интеграция алгоритма Хопкрофта – Карпа позволяет снизить задержки при передаче пакетов данных.

Наконец, данные алгоритмы находят применение в современных координационных интернет-платформах. Сюда относятся:

– сервисы пассажирских перевозок и доставки, где требуется в режиме реального времени распределять свободные транспортные средства по точкам вызова в конкретном географическом секторе;

– автоматизированные системы рекрутинга, осуществляющие первичное сопоставление пула резюме кандидатов с актуальной базой вакансий по набору ключевых навыков;

– рекомендательные веб-сервисы, использующие двудольные модели для анализа связей между профилями пользователей и предлагаемым контентом.

Таким образом, корректный учет масштаба обрабатываемых данных и аппаратных ограничений целевой системы позволяет разработчикам осуществлять обоснованный выбор между простотой реализации алгоритма Куна и вычислительной мощностью метода Хопкрофта – Карпа.

Список литературы

1. Дистель, Р. Теория графов / Р. Дистель ; пер. с англ. – Новосибирск : Институт математики, 2002. – 336 с.

2. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн ; пер. с англ. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2013. – 1296 с. : ил.

References

1. Distel', R. Teoriya grafov / R. Distel' ; per. s angl. – Novosibirsk : Institut matematiki, 2002. – 336 s.

2. Kormen, T. Algoritmy: postroyeniye i analiz / T. Kormen, CH. Leyzerson, R. Rivest, K. Shtayn ; per. s angl. – 3-ye izd. – M. : Vil'yams, 2013. – 1296 s. : il.

© А.В. Костиневич, В.В. Костиневич, 2026

УДК 519.852

А.П. МЕДВЕДЕВ
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ МЕР ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ КОМПЬЮТЕРНЫМ АТАКАМ НА ОСНОВЕ ВЛОЖЕННЫХ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИЙ

Ключевые слова: вложенная кусочно-линейная регрессия; задача линейно-булева программирования; кластеризация переменных; кибербезопасность; метод наименьших модулей; регрессионное моделирование.

Аннотация. Данная работа посвящена задаче моделирования результативности мер противодействия компьютерным атакам с использованием вложенных кусочно-линейных регрессий. Целью исследования является разработка алгоритмического способа решения задачи идентификации параметров модели, формирования составов индексных множеств и выделения доминирующих факторов.

Методы и объект исследования: объектом исследования является однородная вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа, методами – линейный регрессионный анализ и аппарат линейно-булева программирования для решения оптимизационной задачи.

Результаты: разработана алгоритмическая схема, позволяющая в случае использования метода наименьших модулей свести задачу идентификации параметров кусочно-линейной регрессии второго типа к задаче линейно-булева программирования. Построены кусочно-линейные регрессионные модели результативности мер противодействия компьютерным атакам на основе статистических данных Национального координационного центра по компьютерным инцидентам за первое полугодие 2026 г. и аналогичный период 2025 г., выделены доминирующие факторы и проведена интерпретация результатов. В качестве независимых переменных модели использованы: количество владельцев российских информационных ресурсов, проинформированных о наличии признаков компьютерных инцидентов, число доменных имен, снятых с делегирования, количество уведомлений, направленных российским операторам связи, а также число случаев оказания содействия участникам государственной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак, а также реагирования на компьютерные инциденты. Показано, что доминирующим фактором, определяющим результативный показатель, является снятие доменных имен с делегирования, что подтверждает высокую эффективность данной меры оперативного реагирования на киберугрозы.

Введение

Моделирование процессов обеспечения информационной безопасности, в особенности оценки результативности мер противодействия компьютерным атакам, предполагает применение как весьма простых, обычно линейных, зависимостей (например, корреляция между объемом трафика и числом инцидентов), так и довольно сложных соотношений смешанного характера, вплоть до задействования модельных форм, принадлежащих разным функциональным классам. Сложность обусловлена множеством факторов: стохастической природой атак, нестационарностью поведения злоумышленников, наличием пороговых эффектов (срабатывание средств защиты только при превышении определенного уровня угрозы), а также иерархической структурой самой системы защиты, где решения принимаются на нескольких уровнях (сетевом, хостовом, прикладном). Для моделирования подобного рода сложных систем в настоящее время применяются самые разнообразные подходы. Так, в работе [1] показано, как классические дифференциальные уравнения могут иметь применение для анализа

киберугроз и разработки мер противодействия. В источнике [2] показан подход, объединяющий стохастические модели, игровую теорию и адаптивное обучение для моделирования составного поведения атакующих и защитников в реальном времени. В материале [3] приведены результаты разработки метода оценки безопасности киберфизических систем на основе модели Лотки – Вольтерры. Отдельное место занимают модели смешанно-целочисленного программирования. Так, например, в статье [4] представлены модели смешанно-целочисленного программирования для анализа скоординированных многовекторных атак на сети, что напрямую связано с оптимизацией мер противодействия. В исследовании [5] на этой же основе предложены модели, осуществляющие помощь в принятии решения при выборе мер защиты. В работе [6] на основе смешанно-целочисленного программирования предложен подход, направленный на оценку и прогнозирования штатной численности подразделений по защите информации, основываясь на гипотезе о лимитирующем характере данного вида ресурсов.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим однородные кусочно-линейные регрессии первого и второго типов:

– однородная вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа:

$$y_k = min\{ min_{i\in I^1}\{ a_i^1 x_{ki}\}, ..., min_{i\in I^G}\{ a_i^G x_{ki}\}\} + \varepsilon_k; \quad (1)$$

– однородная вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа:

$$y_k = max\{ max_{i\in J^1}\{ \beta_i^1 x_{ki}\}, ..., max_{i\in J^H}\{ \beta_i^H x_{ki}\}\} + \varepsilon_k. \quad (2)$$

Здесь y – зависимая переменная, x_i, $i = \overline{1,m}$ – независимые переменные, a_i^j, β_i^j, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,G}$ – подлежащие оцениванию параметры, ε_k, $k = \overline{1,n}$ – ошибки аппроксимации, k – номер наблюдения, n – их количество. Индексные множества I^j, $i = \overline{1,G}$, J^j, $j = \overline{1,H}$ являются подмножествами множества $\{1, 2, \ldots, m\}$ и могут иметь непустые пересечения.

Для указанных регрессий примечательны следующие факты. Модели типа (1) позволяют выявить в каждом наблюдении «слабое звено» или лимитирующий фактор (а также группу, которой этот фактор принадлежит). Результат при этом определяется наихудшим (минимальным) показателем среди всех. Улучшение (увеличение) любого фактора, кроме самого слабого, не дает прироста результата и, соответственно, не оказывает влияния на выходную переменную. Подобные модели применимы, например, для оценки надежности систем, когда устойчивость определяется самым слабым звеном, а также могут быть использованы для оценки штатной численности подразделений, когда общий показатель эффективности системы ограничен одним или несколькими факторами, а не является суммой вкладов входящих в нее элементов, то есть имеет место неаддитивный характер. Модели типа (2), напротив, позволяют выделить наиболее сильное воздействие или доминирующий фактор. Результат при этом определяется наилучшим (максимальным) показателем среди всех. Существенным преимуществом использования данного подхода перед традиционными методами, например, использованием функции риска: $y_k = max(\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, ..., \alpha_n x_{kn}) + \varepsilon_k$, $k = \overline{1,n}$ является возможность выделять не только доминирующий фактор, но и доминирующую группу характеристик, что существенно повышает интерпретационные возможности моделей подобного типа. Таким образом, указанный тип моделей (2) находит применение в различных предметных областях, где итоговый результат определяется наиболее сильным воздействующим фактором, а уменьшение остальных факторов при этом не оказывает влияния. Так, в маркетинговых исследованиях подобные модели позволяют идентифицировать наиболее эффективный канал привлечения клиентов. Однако в рамках настоящей работы данный аппарат используется для моделирования результативности мер противодействия компьютерным атакам, где результативный показатель – количество пресеченных вредоносных ресурсов – определяется доминирующим инструментом из числа применяемых. Именно этот класс задач и является объектом исследования в данной работе.

В работе [7] описан метод оценивания неизвестных параметров регрессии (1), сводящийся для оптимизационной задачи $I_1(\alpha) = \sum_{k=1}^{n} |\varepsilon_k| \rightarrow min$ к задаче линейно-булева программирования (**ЛБП**) при заранее заданных составах множеств J^j, $j = \overline{1,H}$. Используя соображения, изложенные в [7], нетрудно видеть,

что указанная задача (2) может быть сведена к задаче ЛБП аналогичным образом. Действительно, введем вещественные переменные:

$$v_{kj} = \max_{i=\overline{1,m}}\{a_i^j x_{ki}\},$$
$$w_k = \max_{j=\overline{1,H}}\{v_{kj}\},$$
$$k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}.$$

Тогда задача ЛБП для модели (2) будет иметь следующий вид:

$$\begin{gathered}
v_{kj} \geq a_i^j x_{ki}, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, i = \overline{1,m}, \\
a_i^j x_{ki} - v_{kj} \geq (s_{kij} - 1)M, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, i = \overline{1,m}, \\
\sum_{i=1}^{m} s_{kij} = 1, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, i = \overline{1,m}, \\
w_k \geq v_{kj}, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, \\
v_{kj} - w_k \geq (1 - r_{kj})M, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, \\
\sum_{j=1}^{H} r_{kj} = 1, k = \overline{1,n}, \\
w_k + u_k - d_k = y_k, k = \overline{1,n}, \\
u_k \geq 0, d_k \geq 0, = y_k, k = \overline{1,n}, \\
v_{kj} \geq 0, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, \\
w_k \geq 0, k = \overline{1,n}, \\
s_{kij} \in \{0,1\}, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, i = \overline{1,m}, \\
r_{kj} \in \{0,1\}, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,H}, \\
\sum_{k=1}^{n}(u_k + d_k) - \delta \sum_{j=1}^{H}\sum_{i=1}^{m} a_i^j \to min.
\end{gathered} \quad (3–15)$$

Здесь δ – наперед заданная малая положительная величина, M – большое положительное число.

Однако в рамках текущей задачи весьма затруднительно заранее определить состав индексных множеств J^j. Поэтому функция потерь для решаемой задачи может быть задана в более общей форме: $\tilde{I}(\alpha^1, \ldots, \alpha^H, J^j, \ldots, J^H) = \sum_{k=1}^{n}|\varepsilon_k|$.

Положим в рамках текущей задачи, что множества J^j, $j = \overline{1,H}$ не пересекаются: $J^j \cap J^i = \emptyset$, $i \neq j$, количество групп переменных $H = 2$, а мощности указанных множеств (количество элементов в них) наперед заданы и равны соответственно:

$$|J^1| = p_1, |J^2| = p_2.$$

Тогда, воспользовавшись приемами, изложенными в работах [8; 9], указанная задача может быть сведена к задаче ЛБП аналогичным образом.

Применим описанный выше подход для построения однородной кусочно-линейной регрессии второго типа для оценки эффективности мер противодействия компьютерным атакам на территории России. Как было описано выше, пусть число внутренних максимумов в модели: $H = 2$. Назначим мощности индексных множеств: $p_1 = p_2 = 2$. В качестве информационной базы для исследования взяты официальные статистические данные Национального координационного центра по компьютерным инцидентам (**НКЦКИ**) [10] за первое полугодие 2026 г. (табл. 1) и аналогичный период 2025 г. (табл. 2). Выбор данного источника обусловлен его статусом: НКЦКИ является основным государственным органом, осуществляющим мониторинг, координацию и методическое обеспечение деятельности по выявлению, предупреждению и ликвидации последствий компьютерных атак в Российской Федерации. Его открытая статистика предоставляет систематизированные, верифицированные данные, что обеспечивает репрезентативность и достоверность выводов.

Из всего множества публикуемых показателей для построения модели были отобраны наиболее значимые факторы, непосредственно отражающие различные аспекты деятельности по противодействию киберугрозам. Критерием отбора служила их содержательная связь с итоговым результатом, а также значительный разброс значений, позволяющий выявить устойчивые закономерности.

В качестве зависимой переменной (y) был выбран показатель «количество вредоносных ресурсов, деятельность которых пресечена». Данный выбор обусловлен тем, что этот показатель является интегральным результативным индикатором всей системы противодействия. Он аккумулирует в себе эффект от применения всех превентивных и оперативных мер: успешное информирование владельцев ресурсов должно приводить к их самостоятельному устранению нарушений, блокировка доменов делает ресурсы недоступными, а уведомления операторов связи и содействие ГосСОПКА направлены на техническое пресечение деятельности. Таким образом, y выступает в роли конечной цели, достижение которой зависит от скоординированного применения других ин-

Таблица 1. Статистические данные НКЦКИ за первое полугодие 2026 г.

Период	y	x_1	x_2	x_3	x_4
30.12.2025 – 14.01.2026	243	29	205	21	518
15.01.2026 – 21.01.2026	1 038	37	1 009	15	309
22.01.2026 – 28.01.2026	551	22	501	15	304
29.01.2026 – 04.02.2026	438	64	428	9	251
12.02.2026 – 18.02.2026	2 164	39	2 149	13	326
19.02.2026 – 25.02.2026	72	48	46	23	289
26.02.2026 – 04.03.2026	2 200	44	2 199	1	248
05.03.2026 – 11.03.2026	3 146	30	3 120	18	265
12.03.2026 – 18.03.2026	2 071	34	2 060	10	286
19.03.2026 – 25.03.2026	1 965	68	1 919	16	309
26.03.2026 – 01.04.2026	1 439	17	1 416	20	302
02.04.2026 – 08.04.2026	2 079	60	2 010	29	350
09.04.2026 – 15.04.2026	1 845	14	1 778	20	242
16.04.2026 – 22.04.2026	848	12	814	19	285
23.04.2026 – 29.04.2026	533	15	153	18	281
30.04.2026 – 06.05.2026	257	13	244	12	247
07.05.2026 – 13.05.2026	177	21	159	11	274
14.05.2026 – 20.05.2026	1484	22	1 468	16	238
21.05.2026 – 27.05.2026	371	87	327	24	269
28.05.2026 – 03.06.2026	125	49	86	24	306
04.06.2026 – 10.06.2026	179	63	101	47	306
11.06.2026 – 17.06.2026	197	25	183	11	309

струментов, что делает его центральным объектом моделирования.

Введем следующие обозначения:

– y – количество вредоносных ресурсов, деятельность которых пресечена, ед.;

– x_1 – количество проинформированных о наличии признаков компьютерных инцидентов владельцев российских информационных ресурсов, ед.;

– x_2 – количество доменных имен, снятых с делегирования, ед.;

– x_3 – количество уведомлений, направленных российским операторам связи, ед.;

– x_4 – количество событий содействия участникам ГосСОПКА, ед.

На этой и следующей страницах приведены таблицы с данными для расчета (табл. 1 и 2).

Воспользуемся для решения указанной задачи специализированным программным обеспечением [11], которое основывается на библиотеках *Google OR-Tools* [12] и *Microsoft Solver Foundation* [13], высокая производительность которых для задач подобного типа наглядно показана в работе [14]. В результате решения поставленной задачи получим следующее.

Модель, построенная на данных 2026 г.:

$$y = max\begin{Bmatrix} max\{2{,}46x_1, 1{,}01x_2\}, \\ max\{3{,}81x_3, 0{,}41x_4\} \end{Bmatrix} + \varepsilon_k, k = \overline{1{,}22}. \quad (16)$$

$$E = 9{,}13\ \%.\ J^1 = \{1{,}2\}, J^2 = \{3{,}4\}.$$

Вектор срабатывания:

$$\lambda = (4, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 4, 3, 2).$$

Таблица 2. Статистические данные НКЦКИ за первое полугодие 2025 г.

Период	y	x_1	x_2	x_3	x_4
26.12.2024 – 08.01.2025	939	45	494	11	242
09.01.2025 – 15.01.2025	907	45	743	15	251
16.01.2025 – 22.01.2025	1 339	27	1 240	6	364
23.01.2025 – 29.01.2025	598	38	391	11	300
30.01.2025 – 05.02.2025	491	34	201	17	258
06.02.2025 – 12.02.2025	1 287	28	1 040	10	236
13.02.2025 – 19.02.2025	813	19	764	14	241
20.02.2025 – 26.02.2025	945	19	710	24	294
27.02.2025 – 05.03.2025	606	31	515	18	287
06.03.2025 – 12.03.2025	394	37	331	14	266
13.03.2025 – 19.03.2025	1 179	27	1 122	13	259
20.03.2025 – 26.03.2025	1 325	48	1 227	20	299
27.03.2025 – 02.04.2025	1 639	19	1 586	7	322
03.04.2025 – 09.04.2025	1 260	29	1 070	8	276
10.04.2025 – 16.04.2025	1 507	126	1 090	10	274
17.04.2025 – 23.04.2025	774	15	455	14	324
24.04.2025 – 30.04.2025	788	26	685	20	304
01.05.2025 – 07.05.2025	660	17	655	1	264
08.05.2025 – 14.05.2025	601	31	410	12	221
15.05.2025 – 21.05.2025	1 743	11	1 119	34	357
29.05.2025 – 04.06.2025	1 369	16	1 161	18	406
05.06.2025 – 11.06.2025	1 011	33	897	31	316

Модель, построенная на данных 2025 г.:

$$y = max\begin{Bmatrix} max\{11{,}96x_1, 1{,}15x_2\}, \\ max\{30{,}25x_3, 1{,}99x_4\} \end{Bmatrix} + \varepsilon_k, k = \overline{1{,}22}. \quad (17)$$

$$E = 10{,}66\ \%. J^1 = \{1{,}2\}, J^2 = \{3{,}4\}.$$

Вектор срабатывания:

$$\lambda = (2, 2, 2, 4, 3, 2, 2, 2, 2, 4, 2, 2, 2, 2, 1, 4, 2, 2, 2, 2, 2, 2).$$

Здесь E – средняя процентная ошибка.

Стоит отметить, что значения критериев адекватности E в обоих случаях являются вполне приемлемыми, как это показано, например, в работе [15], и позволяют говорить о том, что обе модели (16) и (17) пригодны для использования в целях прогнозирования и углубленного анализа исследуемых процессов.

Выводы

В ходе проведенного исследования были решены следующие задачи.

На основе алгоритма идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа построены две регрессионные модели, описывающие процесс результативности принятия мер по противодействию компьютерным атакам на основе официальных статистических данных НКЦКИ за первое полугодие 2026 г. и аналогичный период 2025 г. Обе модели демонстрируют приемлемую точность: значение средней абсолютной процентной ошибки для модели 2026 г. со-

ставляет 9,13 %, для модели 2025 г. – 10,66 %, что находится в допустимых пределах и подтверждает адекватность построенных зависимостей.

Ключевые выводы сравнительного анализа обеих моделей состоят в следующем.

1. Структура доминирования устойчива: в обоих периодах определяющим фактором остается снятие доменов с делегирования (доля срабатываний x_2 77–82 %). Это подтверждает, что данный инструмент является базовым элементом системы оперативного реагирования на киберугрозы. Примечательно, что его доля выросла в 2026 г. на 5 % по сравнению с аналогичным периодом 2025 г.

2. Точность модели в 2026 г. повысилась: снижение средней процентной ошибки с 10,66 % до 9,13 % свидетельствует о том, что модель 2026 г. лучше аппроксимирует данные. Это может быть связано как с улучшением качества статистических данных, так и с повышением эффективности мер противодействия.

На основе проведенного анализа могут быть предложены следующие управленческие решения. В первую очередь целесообразно обеспечить приоритетное развитие инструментария снятия доменов с делегирования, поскольку данный фактор является определяющим в обоих рассматриваемых периодах; его дальнейшее совершенствование, включающее сокращение времени реакции и расширение перечня блокируемых доменных зон, позволит добиться наибольшего прироста результативности противодействия. Кроме того, значительное внимание следует уделить автоматизации процессов, а именно разработке и внедрению автоматизированных систем обнаружения и блокировки доменов, задействованных в фишинговых и мошеннических схемах, что позволит существенно повысить оперативность реагирования. Важным направлением является также усиление международного сотрудничества с зарубежными регистраторами и администраторами доменных зон, что создаст условия для ускорения процедуры снятия делегирования в тех юрисдикциях, где это технически и организационно возможно.

Список литературы

1. Nwokoye, C.H. A Survey of SIR-Based Differential Epidemic Models for Control and Security Against Malware Propagation in Computer Networks / C.H. Nwokoye // Security and Privacy. – 2026. – Vol. 9. – No. 1. – P. 1–46.

2. Al Nuaim, A. Mathematical Modeling of Adaptive Information Security Strategies Using Composite Behavior Models / A. Al Nuaim, A. Al Nuaim, M. Nadeem, A. Agrawal // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16. – P. 1–27.

3. Евсеев, С.В. Разработка метода оценки безопасности киберфизических систем на основе модели Лотки – Вольтерры / С.В. Евсеев, С.А. Погасий, С.В. Милевский, О.В. Милов, Ю.В. Меленти, И.М. Грод, Д.А. Берестов, Р.А. Федоренко, О.А. Курченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2021. – Т. 5. – № 9(113). – С. 30–47.

4. Allaissem, B.P. Mixed-Integer Programming Models and a Logic-Based Benders Decomposition Method for Solving Coordinated Multi-Vector Attack Graph Problems / B.P. Allaissem, R.M. Curry // Computers & Industrial Engineering. – 2026. – Vol. 218. – P. 1–16.

5. Saha Fobougong, P. Optimized Security Measure Selection: Leveraging MILP Solvers to Balance Risk and Cost / P. Saha Fobougong, M. Mejri, K. Adi // 2025 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR). – 2025. – P. 186–193.

6. Носков, С.И. Применение однородной вложенной кусочно-линейной регрессии с группировкой переменных для моделирования штатной численности подразделений по защите информации / С.И. Носков, А.П. Медведев // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 7. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10180.

7. Носков, С.И. Вычисление оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии / С.И. Носков, С.И. Белинская // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50. – № 4. – С. 115–120.

8. Носков, С.И. Группировка переменных в однородной вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа / С.И. Носков, С.В. Беляев, А.П. Медведев // Вестник ТОГУ. – 2025. –

№ 4(79). – С. 79–86.

9. Носков, С.И. Оценивание параметров и группировка переменных в смешанной кусочно-линейной регрессии / С.И. Носков, С.В. Беляев, А.Р. Чекалова, А.П. Медведев // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 5(167). – С. 44–48.

10. Официальный сайт Национального координационного центра по компьютерным инцидентам (НКЦКИ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.cert.gov.ru/news/osnovnye-rezultaty.

11. Носков, С.И. Программа идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа / С.И. Носков, А.П. Медведев : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680404. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». – Бюллетень № 8. – 2025. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www1.fips.ru/ofpstorage/bulletin/prevm/2025/08/20/index.htm.

12. Google OR-Tools [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://developers.google.com/optimization.

13. Microsoft Solver Foundation [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://lpsolve.sourceforge.net/5.5/MSF.htm.

14. Носков, С.И. Сравнительный анализ производительности библиотек LPSolve, Microsoft Solver Foundation и Google OR-Tools на примере задачи линейно-булева программирования большой размерности / С.И. Носков, А.П. Медведев, С.П. Середкин // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 11. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10557.

15. White, I.R. Simsum: Analyses of Simulation Studies Including Monte Carlo Error / I.R. White // The Stata Journal. – 2010. – Vol. 10, No. 3. – P. 369–385.

References

3. Yevseyev, S.V. Razrabotka metoda otsenki bezopasnosti kiberfizicheskikh sistem na osnove modeli Lotki – Vol'terry / S.V. Yevseyev, S.A. Pogasiy, S.V. Milevskiy, O.V. Milov, YU.V. Melenti, I.M. Grod, D.A. Berestov, R.A. Fedorenko, O.A. Kurchenko // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2021. – T. 5. – № 9(113). – S. 30–47.

6. Noskov, S.I. Primeneniye odnorodnoy vlozhennoy kusochno-lineynoy regressii s gruppirovkoy peremennykh dlya modelirovaniya shtatnoy chislennosti podrazdeleniy po zashchite informatsii / S.I. Noskov, A.P. Medvedev // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2025. – № 7. – [Electronic resource]. – Access mode : https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10180.

7. Noskov, S.I. Vychisleniye otsenok parametrov odnorodnoy vlozhennoy kusochno-lineynoy regressii / S.I. Noskov, S.I. Belinskaya // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2023. – T. 50. – № 4. – S. 115–120.

8. Noskov, S.I. Gruppirovka peremennykh v odnorodnoy vlozhennoy kusochno-lineynoy regressii pervogo tipa / S.I. Noskov, S.V. Belyayev, A.P. Medvedev // Vestnik TOGU. – 2025. – № 4(79). – S. 79–86.

9. Noskov, S.I. Otsenivaniye parametrov i gruppirovka peremennykh v smeshannoy kusochno-lineynoy regressii / S.I. Noskov, S.V. Belyayev, A.R. Chekalova, A.P. Medvedev // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 5(167). – S. 44–48.

10. Ofitsial'nyy sayt Natsional'nogo koordinatsionnogo tsentra po komp'yuternym intsidentam (NKTSKI) [Electronic resource]. – Access mode : https://www.cert.gov.ru/news/osnovnye-rezultaty.

11. Noskov, S.I. Programma identifikatsii parametrov odnorodnoy vlozhennoy kusochno-lineynoy regressii vtorogo tipa / S.I. Noskov, A.P. Medvedev : svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025680404. Pravoobladatel': Federal'noye gosudarstvennoye byudzhetnoye obrazovatel'noye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Irkutskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya». – Byulleten' № 8. – 2025. – [Electronic resource]. – Access mode : https://www1.fips.ru/ofpstorage/bulletin/prevm/2025/08/20/index.htm.

14. Noskov, S.I. Sravnitel'nyy analiz proizvoditel'nosti bibliotek LPSolve, Microsoft Solver Foundation i Google OR-Tools na primere zadachi lineyno-buleva programmirovaniya bol'shoy razmernosti / S.I. Noskov, A.P. Medvedev, S.P. Seredkin // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2025. – № 11. – [Electronic resource]. – Access mode : https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10557.

© А.П. Медведев, 2026

УДК 004.89

В.В. ОСТРОВСКИЙ, М.Г. ДОРРЕР
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

ВЫБОР ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ЗАПУСКА ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ OLLAMA И VLLM

Ключевые слова: задержка ответа; локальный запуск; метрики производительности; параллельная нагрузка; пропускная способность; языковые модели; *Ollama*; *vLLM*.

Аннотация. Цель работы заключается в сравнении *Ollama* и *vLLM* как инструментов локального запуска языковых моделей. Задачи исследования состоят в сопоставлении удобства первичного развертывания, ресурсных требований, задержки ответа, пропускной способности и сопровождения модели, а также в определении условий, при которых каждый инструмент целесообразен для практического применения. Методы исследования включают анализ документации *Ollama* и *vLLM*, сравнительный анализ функциональных и эксплуатационных характеристик, а также обобщение опубликованных результатов бенчмаркинга по показателям *TPS*, *RPS*, *TTFT*, *ITL* и перцентилям *P*50, *P*95, *P*99. Гипотеза состоит в том, что выбор инструмента определяется не только скоростью генерации, но и стадией проекта, числом пользователей и требованиями к эксплуатации. В качестве эмпирического аргумента использованы опубликованные внешние метрики. Результатом является вывод о целесообразности *Ollama* для быстрой локальной проверки модели и о преимуществах *vLLM* при параллельной нагрузке.

Обозначения:

– Токен – минимальная единица текста, обрабатываемая моделью;

– *P*50 – медианное значение метрики; для задержек – с или мс;

– *P*95 – 95-й перцентиль метрики; для задержек – с или мс;

– *P*99 – 99-й перцентиль метрики; для задержек – с или мс;

– *API* – программный интерфейс приложения;

– *GPU* – графический процессор;

– *ITL* – задержка между соседними токенами – с или мс;

– *KV-cache* – кэш ключей и значений; измеряется в байтах, МБ или ГБ;

– *RPS* – количество завершенных запросов в секунду; запрос/с;

– *TPOT* – среднее время генерации выходного токена; с/токен или мс/токен;

– *TPS* – количество сгенерированных токенов в секунду; токен/с;

– *TTFT* – время до первого токена; с или мс.

Введение

Языковые модели применяются для генерации текстов, анализа документов, поиска по корпоративным материалам и помощи в программировании. Распространение открытых моделей сделало возможным их запуск не только через внешний облачный сервис, но и в инфраструктуре самой организации: на персональном компьютере, рабочей станции или сервере [2; 4; 6]. Поэтому при внедрении возникает практический вопрос: какой инструмент выбрать для локального запуска модели в конкретной задаче.

Ollama и *vLLM* решают одну общую задачу: предоставляют пользователю или приложению доступ к языковой модели, но делают это с разными приоритетами. *Ollama* снижает технический порог входа и помогает быстро проверить модель, данные и промпты. *vLLM* ориентирован на устойчивое обслуживание запросов, эффективное использование *GPU* и работу при параллельной нагрузке. Цель исследования –

сопоставить эти инструменты по функциональным, ресурсным и эксплуатационным критериям. Методами исследования выступают анализ документации, сравнение показателей производительности и интерпретация опубликованных метрик.

Платформы *Ollama* и *vLLM*

Ollama представляет собой удобный инструмент для первичного развертывания и проверки открытых языковых моделей: установка, загрузка модели и запуск выполняются с минимальными техническими затратами [3]. Настройки модели и параметры ее использования задаются через *Modelfile*, где могут быть определены системная инструкция, шаблон запроса, температура генерации и другие параметры [3].

Поддержка *OpenAI*-совместимого интерфейса упрощает интеграцию *Ollama* с приложениями, уже ориентированными на данный формат взаимодействия. Использование *GPU* позволяет ускорить генерацию и эффективнее распределить вычислительную нагрузку [3]. В совокупности эти свойства делают *Ollama* рациональным выбором для локального прототипирования, проверки промптов и предварительной оценки применимости модели. Вместе с тем при увеличении числа пользователей возрастают требования к управлению очередями запросов, мониторингу и контролю времени ответа.

vLLM, в отличие от *Ollama*, ориентирован на обслуживание языковых моделей в условиях параллельной нагрузки [7]. Его архитектурные решения, включая *PagedAttention*, направлены на более эффективное использование памяти и управление *KV-cache* при одновременной обработке запросов [1; 7]. Поддержка квантования позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам, однако такие изменения требуют последующей проверки качества генерируемых ответов [7].

Следовательно, сравнение *Ollama* и *vLLM* должно учитывать не только скорость генерации, но и контекст внедрения. *Ollama* рациональна на ранней стадии, когда проверяются данные, промпты и прикладная ценность модели. *vLLM* рационален тогда, когда модель становится частью *API* или внутреннего сервиса с несколькими пользователями.

Внешние метрики производительности

Для количественной проверки различий использованы опубликованные внешние метрики сравнительного тестирования [5]. В тестовой конфигурации применялись один графический ускоритель *NVIDIA A*100-*PCIE*-40*GB*, версии *vLLM* 0.9.1 и *Ollama* 0.9.2, модель *Llama* 3.1 8*B Instruct* в формате *FP*16, инструмент *GuideLLM* 0.2.1, фиксированный набор данных и уровни одновременных запросов от 1 до 256. Каждый замер длился 300 секунд; анализировались *TPS*, *RPS*, *P*99 *TTFT* и *P*99 *ITL* [5].

По метрике *TPS* различие проявляется как различие в способности системы использовать параллельную нагрузку. У *vLLM* скорость генерации выросла примерно с 65 выходных токенов/с при одном запросе до 562 токенов/с при 16 запросах, 792 токенов/с при 64 запросах и пика около 846 токенов/с при 128 запросах. При 256 запросах показатель немного снизился до 799 токенов/с, что указывает на приближение к насыщению ресурса. У *Ollama* в стандартной конфигурации показатель оставался в узком диапазоне 56–73 выходных токена/с, поэтому преимущество *vLLM* увеличивалось примерно от 1,2 раза при одном запросе до 12,4 раза при 128 запросах [5].

Метрика *RPS* подтверждает тот же вывод в пересчете на завершенные пользовательские запросы. *vLLM* увеличивал пропускную способность с 0,20 запроса/с при одиночной нагрузке до 1,73 запроса/с при 16 запросах, 2,53 запроса/с при 64 запросах и 2,63 запроса/с при 128 запросах. У *Ollama* показатель почти не менялся и находился около 0,23–0,26 запроса/с. Это означает, что при росте числа пользователей система не столько обслуживает больше запросов одновременно, сколько накапливает очередь ожидания.

Наиболее чувствительным для пользователя является время до первого токена. В стандартной конфигурации при четырех одновременных запросах *P*99 *TTFT* составлял около 0,9 с у *vLLM* и около 13,1 с у *Ollama*. При 64 запросах различие возрастало до 10 с против 250,1 с, а при 256 запросах – до 28,1 с против 288,8 с соответственно. Следовательно, основная проблема *Ollama* под нагрузкой связана не только со скоростью генерации уже начатого ответа, но и с ожиданием начала обработки запроса.

Метрика *P*99 *ITL* показывает, что в стан-

дартной конфигурации *Ollama* удерживала задержку между токенами около 30–32 мс даже при высокой нагрузке, но этот результат не означает лучшую масштабируемость: значительная часть задержки переносилась в очередь и отражалась в *TTFT*. У *vLLM* межтокенная задержка возрастала от 16–31 мс при малой и средней нагрузке до 81 мс при 64 запросах и 105–109 мс при 128–256 запросах, однако система при этом обслуживала существенно больше запросов и токенов в единицу времени [5].

Отдельно показательна настроенная конфигурация *Ollama* с увеличенным параллелизмом. Даже после настройки *P*99 *TTFT* при 64 одновременных запросах составлял около 118 с, тогда как у *vLLM* оставался на уровне 9–10 с. По *P*99 *ITL* настроенная *Ollama* становилась нестабильной: около 680 мс при 16 запросах, около 5,8 с при 32 запросах и около 2,8 с при 64 запросах. У *vLLM* в той же части испытания межтокенная задержка оставалась приблизительно в диапазоне 45–90 мс.

Таким образом, опубликованные данные показывают разные режимы деградации. *Ollama* удобна до тех пор, пока запросы единичны или выполняются небольшой группой пользователей; при росте параллельности она быстро переходит к очередям и резкому росту хвостовых задержек. *vLLM* также не устраняет задержки полностью, но лучше преобразует доступный ресурс *GPU* в общую пропускную способность и удерживает более предсказуемые хвостовые показатели. Эти значения зависят от аппаратно-программной конфигурации и не заменяют проверки в инфраструктуре конкретной организации.

Практические рекомендации

Практическую проверку инструмента следует начинать с ограниченного локального контура: выбрать одну или две модели, зафиксировать параметры генерации, подготовить одинаковый набор русскоязычных запросов и документов, оценить качество ответов, устойчивость к длинному контексту и соблюдение требований конфиденциальности. Для этого этапа *Ollama* удобна как среда быстрых итераций. После качественного отбора модели нужно измерять *TPS*, *RPS*, *TTFT*, *ITL*, *P*50, *P*95, *P*99, долю ошибок, загрузку *GPU*/*VRAM* и стоимость генерации на одинаковых сценариях.

Если система должна обслуживать несколько пользователей или приложений, до перехода к *vLLM* необходимо определить эксплуатационные требования: формат *API*, лимиты длины контекста, правила тайм-аутов, журналирование без раскрытия конфиденциального содержания, мониторинг *GPU* и *VRAM* и порядок отката версии модели. Внешние метрики полезны как ориентир, но окончательное решение должно подтверждаться собственным тестированием на реальных данных организации.

Заключение

Проведенное сравнение показывает, что *Ollama* и *vLLM* решают общую задачу локального запуска языковых моделей, но относятся к разным стадиям проекта. *Ollama* рациональна для первичной проверки модели, промптов и прикладной ценности решения; *vLLM* целесообразен тогда, когда модель становится внутренним сервисом и должна обслуживать параллельные запросы через *API*.

Опубликованные внешние метрики подтверждают это различие: при росте параллельной нагрузки *vLLM* демонстрирует более высокую пропускную способность и более управляемые хвостовые задержки, тогда как *Ollama* быстрее переходит к очередям ожидания. Следовательно, выбор инструмента должен быть результатом проверки в условиях конкретной организации: для локальной разработки оправдана *Ollama*, для серверного обслуживания локально размещенной модели следует планировать *vLLM* или сопоставимую систему обслуживания.

Список литературы / References

1. Kwon, W. Efficient Memory Management for Large Language Model Serving with PagedAttention / W. Kwon, Z. Li, S. Zhuang, Y. Sheng, L. Zheng, C.H. Yu, J.E. Gonzalez, H. Zhang, I. Stoica // Proceedings of the ACM SIGOPS 29th Symposium on Operating Systems Principles. – New York : Association for Computing Machinery, 2023. – P. 611–626. – [Electronic resource]. – Access mode : https://arxiv.org/abs/2309.06180.

2. Meta. Llama 3.1 model information [Electronic resource]. – Access mode : https://llama.

meta.com.

3. Ollama Documentation: official documentation [Electronic resource]. – Access mode : https://docs.ollama.com.

4. Touvron, H. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models / H. Touvron, L. Martin, K. Stone [et al.]. – 2023. – arXiv:2307.09288. – [Electronic resource]. – Access mode : https://arxiv.org/abs/2307.09288.

5. Umesh, H. Ollama vs. vLLM: A deep dive into performance benchmarking / H. Umesh // Red Hat Developer. – 2025. – [Electronic resource]. – Access mode : https://developers.redhat.com/articles/2025/08/08/ollama-vs-vllm-deep-dive-performance-benchmarking.

6. Vaswani, A. Attention Is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, L. Kaiser, I. Polosukhin // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008. – [Electronic resource]. – Access mode : https://arxiv.org/abs/1706.03762.

7. vLLM Documentation: official documentation [Electronic resource]. – Access mode : https://docs.vllm.ai.

© В.В. Островский, М.Г. Доррер, 2026

УДК 004.89

А.А. САВИНОВ, А.Г. СОЛОДОВ
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ДОСТАТОЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ИМПЛЕМЕНТАЦИИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ С ЖЕСТКИМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ И ГАБАРИТАМ

Ключевые слова: интегральный критерий; искусственный интеллект; минимально достаточная конфигурация; многокритериальная оценка; нейросетевые алгоритмы; энергоэффективность.

Аннотация. Целью исследования является разработка методики определения минимально достаточной конфигурации вычислительных средств для реализации нейросетевых алгоритмов управления во встроенных устройствах с жесткими ограничениями по энергопотреблению и габаритам. Для достижения цели выполнен анализ существующих подходов к выбору вычислительных платформ и разработан интегральный критерий их оценки. Гипотеза исследования заключается в том, что комплексная оценка аппаратных платформ на основе нормализованных параметров и их весовой значимости позволяет повысить обоснованность выбора минимально достаточной конфигурации. В работе использованы методы анализа научной литературы, многокритериальной оценки и теоретического анализа. В результате предложена методика, обеспечивающая формализованный выбор вычислительной платформы, удовлетворяющей требованиям нейросетевого алгоритма управления при минимальном энергопотреблении.

Введение

Развитие систем машинного обучения расширило возможности построения интеллектуальных систем управления. В отличие от классических алгоритмов, опирающихся на формализованные модели объекта, нейронные сети позволяют аппроксимировать сложные нелинейные зависимости, обрабатывать многомерные входные данные и обеспечивать высокую точность решений в условиях неопределенности [2].

Параллельно наблюдается тенденция к переносу вычислений на периферийные устройства, что снижает задержки, разгружает каналы связи и повышает автономность системы при ограниченном сетевом взаимодействии [3]. Однако практическая реализация нейросетевых алгоритмов на встроенных платформах сталкивается с жесткими ограничениями по производительности, объему памяти, энергопотреблению и габаритам, особенно критичными для мобильных автономных систем с аккумуляторным питанием.

Следовательно, актуальна задача разработки формализованной методики выбора минимально достаточной конфигурации вычислительных средств, удовлетворяющей требованиям по быстродействию, памяти, энергопотреблению и точности модели [8].

Цель исследования – разработка указанной методики для устройств с жесткими ограничениями по энергопотреблению и габаритам.

Анализ существующих подходов

Выбор аппаратной платформы для нейросетевых систем управления является ключевым этапом, поскольку вычислительные затра-

ты зависят от архитектуры модели, что делает оценку требований к ресурсам комплексной задачей. Сложность современных нейросетей повышает требования к памяти и производительности, особенно во встраиваемых системах [7]. В задачах управления время инференса ограничено шагом дискретизации, а рост производительности сопряжен с увеличением энергопотребления. Следовательно, выбор платформы носит многокритериальный характер [8].

Раздельный учет производительности, памяти, энергопотребления и времени инференса не позволяет определить минимально достаточную конфигурацию, поскольку пригодность платформы определяется не абсолютными значениями характеристик, а их соответствием требованиям конкретной задачи.

Существующие подходы ориентированы на сравнение отдельных характеристик и не обеспечивают объективного выбора, что требует разработки комплексной методики, учитывающей особенности конкретного алгоритма и взаимосвязь всех значимых параметров [6].

Разработка методики определения минимально достаточной конфигурации вычислительных средств

Проведенный анализ показывает, что выбор вычислительной платформы определяется совокупностью требований. Для каждой вычислительной платформы определяются фактические значения следующих параметров: вычислительная производительность (P), объем оперативной памяти (M), время выполнения одного цикла инференса (L), энергопотребление (E) и точность нейросетевой модели (A). Для рассматриваемого алгоритма управления предварительно задаются требуемые значения этих же параметров: (P_{req}), (M_{req}), (L_{req}), (E_{req}) и (A_{req}).

Поскольку рассматриваемые характеристики имеют различную физическую размерность, их непосредственное сравнение невозможно. Для формирования единого критерия оценки вводятся безразмерные коэффициенты соответствия [10].

Для параметров, увеличение которых является положительным фактором, коэффициент определяется как отношение фактического значения к требуемому:

$$C_x = \min\left(\frac{X}{X_{req}}, 1\right). \quad (1)$$

Для параметров, уменьшение которых повышает эффективность вычислительной платформы, используется зависимость:

$$C_x = \min\left(\frac{X_{req}}{X}, 1\right). \quad (2)$$

Использование функции ограничения исключает влияние избыточных ресурсов на оценку: после достижения требуемого уровня дальнейшее увеличение производительности или памяти не повышает коэффициент соответствия. Все коэффициенты принимают значения в диапазоне:

$$0 \le C_x \le 1. \quad (3)$$

На первом этапе проверяется выполнение условий: $C_P = 1$; $C_M = 1$; $C_L = 1$; $C_A = 1$. Невыполнение любого из них исключает платформу из дальнейшего рассмотрения.

Для сравнения допустимых конфигураций вводится интегральный показатель оценки:

$$K = w_P C_P + w_M C_M + w_L C_L + w_E C_E + w_A C_A, \quad (4)$$

где w_P, w_M, w_L, w_E и w_A являются весовыми коэффициентами критериев и удовлетворяют условию $w_P + w_M + w_L + w_E + w_A = 1$. Их использование позволяет адаптировать предложенную методику к различным классам интеллектуальных устройств.

Минимально достаточной предлагается считать платформу, удовлетворяющую всем ограничениям и обладающую минимальным энергопотреблением. Данное условие определяется выражением:

$$E(H^*) = \min_{(H_i \in H_a)} E(H_i), \quad (5)$$

Предложенная методика включает два последовательных этапа. На первом этапе определяется возможность реализации нейросетевого алгоритма на рассматриваемой платформе путем проверки обязательных ограничений. На втором этапе среди допустимых вариантов выбирается конфигурация, обеспечивающая минимальное энергопотребление при максимальном значении интегрального показателя (K).

Таблица 1. Исходные характеристики рассматриваемых вычислительных платформ

Параметр	Платформа 1	Платформа 2	Платформа 3
Производительность, *MOPS*	180	240	320
Оперативная память, КБ	512	1024	2048
Время инференса, мс	11	8	6
Энергопотребление, Вт	0,35	0,52	0,91
Точность модели, %	95	95	95

Анализ применения разработанной методики

Для демонстрации методики рассмотрим выбор платформы для нейросетевого управления встроенным устройством. Модель требует: производительность ≥ 200 *MOPS*, ОЗУ ≥ 512 КБ, время инференса ≤ 10 мс, точность ≥ 95 %. Энергопотребление выступает критерием оптимизации. В качестве примера рассмотрены три условные платформы (табл. 1).

На первом этапе для каждой платформы вычисляются коэффициенты соответствия по формулам (1)–(3). Для первой платформы:

– по вычислительной производительности:

$$C_P = \min\left(\frac{180}{200}, 1\right) = 0{,}9;$$

– по объему оперативной памяти:

$$C_M = \min\left(\frac{512}{512}, 1\right) = 1;$$

– по времени выполнения инференса:

$$C_L = \min\left(\frac{10}{11}, 1\right) = 0{,}91;$$

– по энергопотреблению:

$$C_E = \min\left(\frac{0{,}6}{0{,}35}, 1\right) = 1;$$

– по точности модели:

$$C_A = \min\left(\frac{95}{95}, 1\right) = 1.$$

Полученные значения показывают, что первая платформа не удовлетворяет требованиям: $C_P < 1$ и $C_L < 1$. Согласно разработанной методике, данная конфигурация исключается из дальнейшего рассмотрения.

Аналогичным образом выполняются расчеты для второй платформы:

$$C_P = 1,\ C_M = 1,\ C_L = 1,$$

$$C_E = \min\left(\frac{0{,}6}{0{,}52}, 1\right) = 1,\ C_A = 1.$$

Для третьей платформы результаты имеют вид:

$$C_P = 1,\ C_M = 1,\ C_L = 1,$$

$$C_E = \min\left(\frac{0{,}6}{0{,}91}, 1\right) = 0{,}66,\ C_A = 1.$$

Обе платформы удовлетворяют обязательным ограничениям.

В качестве примера примем следующие значения весовых коэффициентов: w_P = 0,25, w_M = 0,15, w_L = 0,30, w_E = 0,20 и w_A = 0,10.

Получаем для второй платформы:

$$K = 0{,}25 * 1 + 0{,}15 * 1 + 0{,}30 * 1 + 0{,}20 * 1 + 0{,}10 * 1 = 1.$$

Для третьей платформы:

$$K = 0{,}25 * 1 + 0{,}15 * 1 + 0{,}30 * 1 + 0{,}20 * 0{,}66 + 0{,}10 * 1 = 0{,}932.$$

Полученные результаты свидетельствуют о непригодности первой платформы из-за недостаточной производительности и превышения времени инференса. Вторая и третья удовлетворяют ограничениям, но вторая предпочтитель-

нее по энергопотреблению и, согласно формуле (5), является минимально достаточной.

Заключение

В работе рассмотрена задача выбора минимально достаточной конфигурации вычислительных средств для нейросетевого управления при ограничениях по энергопотреблению и габаритам. Предложена методика комплексной оценки на основе безразмерных коэффициентов соответствия и интегрального критерия, учитывающего производительность, память, время инференса, энергопотребление и точность. Процедура включает проверку ограничений и ранжирование допустимых конфигураций по энергоэффективности.

На примере показано, что подход исключает выбор недостаточных и избыточных решений, обеспечивая обоснованный выбор минимально достаточной конфигурации на этапе проектирования.

Методика применима для автономных робототехнических комплексов, устройств *IoT*, беспилотных систем и других встраиваемых устройств с ограниченными ресурсами.

Список литературы

1. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
2. Савинов, А.А. Анализ современных способов вредоносного воздействия на децентрализованные блокчейн-системы / А.А. Савинов, А.Г. Солодов // ITRT-2025 : сборник трудов конференции. – ФГБОУ ВО «ПВГУС», 2025. – С. 322–328.
3. Савинов, А.А. Исследование методов обеспечения неизменяемости данных в защищенных системах / А.А. Савинов, А.Г. Солодов // ВоГУ 2024 : сборник трудов конференции. – 2024. – С. 606–610.
4. Савинов, А.А. Передача информации посредством блокчейн-технологии / А.А. Савинов, А.Г. Солодов // ППВИТТ ПГУТИ : сборник трудов конференции. – 2024. – С. 67–73.
5. Савинов, А.А. Передача данных по беспроводным сетям в условиях переизбытка устройств / А.А. Савинов, А.Г. Солодов // ППВИТТ ПГУТИ : сборник трудов конференции. – 2023. – С. 284–290.
6. Гудфеллоу, И. Глубокое обучение / И. Гудфеллоу, Й. Бенджио, А. Курвилль. – М. : ДМК Пресс, 2018. – 652 с.
7. Warden, P. TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers / P. Warden, D. Situnayake. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. – 490 p.
8. Паздерин, А.В. Обзор и перспективы применения алгоритмов машинного обучения для противоаварийного управления электрическими режимами энергосистем / А.В. Паздерин, М.Д. Сенюк // Электричество. – 2025. – № 10. – С. 22–36.
9. Петров, А.М. Совершенствование архитектуры интеллектуальных систем управления / А.М. Петров, А.Н. Попов, О.Н. Кузяков // Автоматизация и информатизация топливно-энергетического комплекса. – 2023. – № 4 (597). – С. 15–22.
10. Суминов, К.А. Метод выбора рационального состава функционального программного обеспечения бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов / К.А. Суминов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 55–66.

References

1. Khaykin, S. Neyronnyye seti: polnyy kurs / S. Khayking. – 2-ye izd. – M.: Izdatel'stvo «Uil'yams», 2006. – 1104 s.
2. Savinov, A.A. Analiz sovremennykh metodov zlonamerennogo vozdeystviya na detsentralizovannyye blokcheyn-sistemy / A.A. Savinov, A.G. Solodov // ITRT-2025: sbornik trudov konferentsii. – FGBOU V «PVGUS», 2025. – S. 322–328.
3. Savinov, A.A. Issledovaniye metodov obespecheniya neizmenyayemosti dannykh v zashchishchennykh sistemakh / A.A. Savinov, A.G. Solodov // VoSU 2024: sbornik trudov

konferentsii. – 2024. –S. 606–610.

4. Savinov, A.A. Peredacha informatsii posredstvom tekhnologii blokcheyn / A.A. Savinov, A.G. Solodov // PPVTT PGUTI: sbornik trudov konferentsii. – 2024. – S. 67–73.

5. Savinov, A.A. Peredacha dannykh po besprovodnym setyam v usloviyakh izbytochnosti ustroystv / A.A. Savinov, A.G. Solodov // PPVTT PGUTI: sbornik trudov konferentsii. – 2023. – S. 284–290.

6. Gudfellou, I. Glubokoye obucheniye / I. Gudfellou, I. Bendzhio, A. Kurvil'. – M. : DMK Press, 2018. – 652 s.

7. Uorden, P. TinyML: mashinnoye obucheniye s TensorFlow Lite na Arduino i sverkhnizkopotreblyayushchikh mikrokontrollerakh / P. Uorden, D. Situnayake. – Sevastopol': O'Reilly Media, 2020. – 490 s.

8. Pazderin, A.V. Obzor i perspektivy primeneniya algoritmov mashinnogo obucheniya dlya avariynogo upravleniya elektricheskimi rezhimami energosistem / A.V. Pazderin, M.D. Senyuk // Elektrichestvo. – 2025. – № 10. – S. 22–36.

9. Petrov, A.M. Sovershenstvovaniye arkhitektury intellektual'nykh sistem upravleniya / A.M. Petrov, A.N. Popov, O.N. Kuzyakov // Avtomatizatsiya i informatizatsiya toplivno-energeticheskogo kompleksa.Chechenskogo kompleksa. – 2023. – № 4(597). – S. 15–22.

10. Suminov, K.A. Metod vybora ratsional'noy kompozitsii funktsional'nogo programmnogo obespecheniya bortovykh vychislitel'nykh sistem robotizirovannykh kompleksov / K.A. Suminov // Novosti vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzh'ya. Tekhnicheskiye nauki. – 2025. – № 1. – S. 55–66.

© А.А. Савинов, А.Г. Солодов, 2026

УДК 519

О.А. ТОРШИНА, К.О. СВЕТУС, В.И. ГОРБАТОВ, А.Ф. МУСТАФИН
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Ключевые слова: аэродинамические характеристики; воздушный поток; вычислительная гидродинамика; математическое моделирование; турбулентные течения; уравнения Навье – Стокса; *CFD*-моделирование.

Аннотация. Цель настоящей статьи заключается в разработке математической модели аэродинамической трубы и изучении параметров воздушного потока с использованием программного комплекса *SOLIDWORKS Flow Simulation*. Исследование модели дает возможность измерить аэродинамические силы и моменты, определить местные скорости течения воздуха и углы примыкания потока, изучить распределение давления по поверхности. Эксперимент в аэродинамической трубе позволяет наблюдать действительную картину обтекания и способствует уточнению рассчитанных аэродинамических характеристик на предшествующих этапах проектирования.

Для ее достижения поставлены задачи: составить математическую модель, рассмотреть математические методы решения полученной задачи, осуществить программную реализацию. В работе использованы методы математического моделирования и вычислительной гидродинамики. Применение *CFD*-моделирования позволило получить подробную информацию о структуре потока, распределении давления и скорости, а также оценить влияние геометрических параметров исследуемого объекта на аэродинамические характеристики.

Развитие современных технологий в области авиации, автомобилестроения, энергетики и машиностроения сопровождается необходимостью проведения исследований аэродинамических процессов. Одним из наиболее распространенных инструментов для изучения характеристик воздушных потоков являются аэродинамические трубы, позволяющие исследовать распределение скоростей и давлений, особенности обтекания тел и процессы формирования турбулентных течений [1].

Традиционные методы экспериментальных исследований требуют значительных финансовых и временных затрат, связанных с изготовлением физических моделей и проведением испытаний на специализированном оборудовании [3]. В связи с этим в последние десятилетия широкое распространение получили методы математического моделирования и вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics* – ***CFD***), позволяющие проводить исследования аэродинамических процессов с использованием современных программных средств [2].

Методы вычислительной гидродинамики основаны на численном решении фундаментальных уравнений механики жидкости и газа, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии [4]. Применение *CFD*-моделирования позволяет получать подробную информацию о структуре потока, распределении давления и скорости, а также оценивать влияние геометрических параметров исследуемого объекта на аэродинамические характеристики [6].

В начале работы был выполнен чертеж, изображенный на рис. 1.

Для выполнения численного моделирования использовался программный комплекс *SOLIDWORKS Flow Simulation*, являющийся встроенным модулем вычислительной гидродинамики системы *SOLIDWORKS* [5]. *Flow Simulation* предназначен для решения задач внутренней аэродинамики, внешней аэродинамики, теплообмена, течения жидкостей и газов. Программный комплекс позволил выполнять моделирование непосредственно на основе трехмерной модели без необходимости экспорта геометрии в сторонние программы.

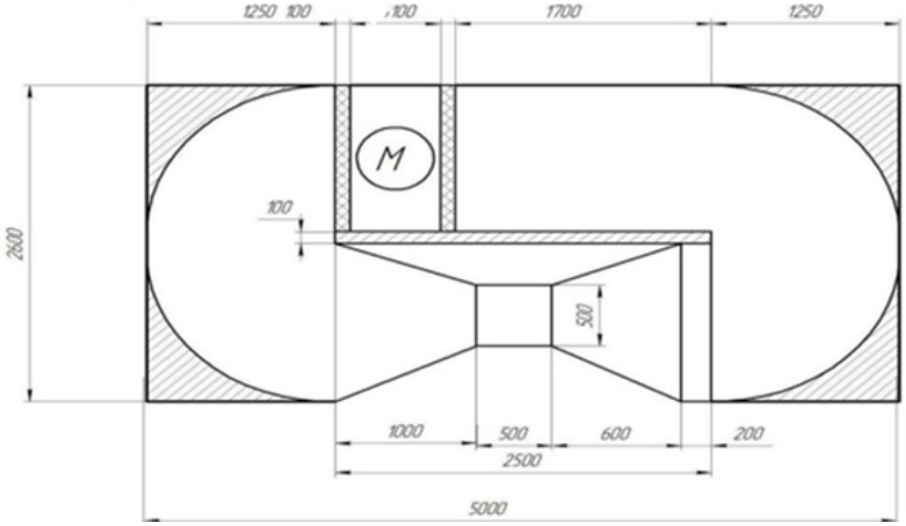


Рис. 1. Аэродинамическая труба

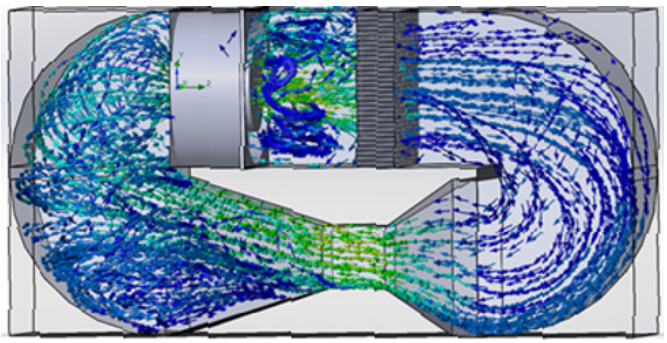


Рис. 2. Траектория воздушного потока в трубе

В основе работы *SOLIDWORKS Flow Simulation* лежит метод конечных объемов (*Finite Volume Method*). Суть метода заключается в разбиении расчетной области на множество контрольных объемов, для каждого из которых выполняется численное решение уравнений гидродинамики.

Метод конечных объемов обеспечивает выполнение законов сохранения, устойчивость вычислений, возможность моделирования сложных геометрий, высокую точность результатов.

Использование данного метода позволяет эффективно исследовать течение воздуха в аэродинамической трубе и получать достоверные результаты расчета.

В результате *SOLIDWORKS Flow Simulation* применялся для автоматического построения расчетной сетки, расчета распределения скорости и давления, моделирования турбулентных течений, визуализации линий тока, построения карт давления и скорости, вычисления аэродинамических характеристик.

Визуализируя полученные результаты (рис. 2), получим траекторию движения воздуха в трубе с разделением по цветам в зависимости от скорости на том или ином участке.

Обратим внимание, что при выходе из вентилятора поток имеет турбулентный характер, но после прохождения участка с сотами он сильно выравнивается [8]. Также заметно, что соты существенно замедляют поток, а конфузор, в свою очередь, наоборот, разгоняет его. Стоит обратить внимание и на то, что при выходе из рабочей зоны поток становится вихреобразным, что связано с тем, что при движении по закругленному участку поток сильно ломается, вновь становясь турбулентным [9].

Если взглянуть на давление (рис. 3), то можно заметить, что при переходе в рабочую область давление в трубе падает, а при прибли-

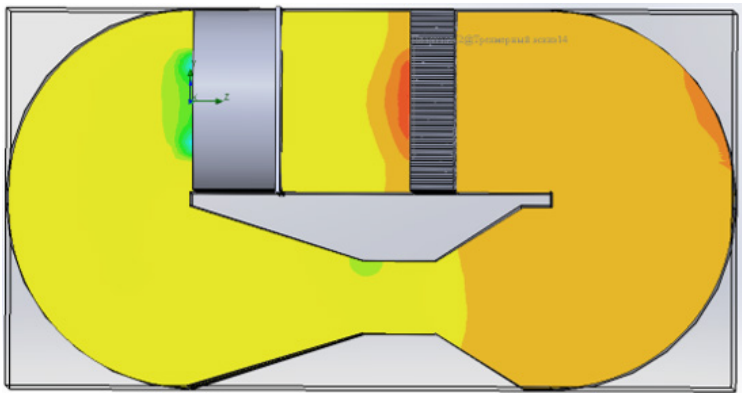


Рис. 3. Давление в трубе

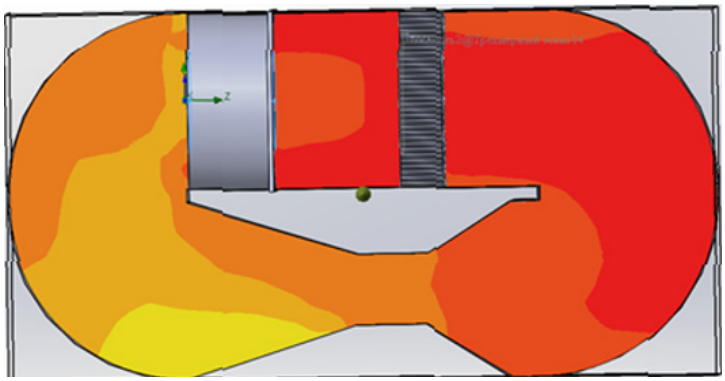


Рис. 4. Температура в трубе

жении к вентилятору падает еще больше, вместе с тем скорость потока увеличивается [11].

Если посмотреть на картину температуры (рис. 4), то можно заметить, что в целом температура в трубе не меняется, но все же в том месте, где возникает сильное завихрение, температура падает.

На основании приведенных выше рисунков можно сделать вывод, что при небольших скоростях потока рассматриваемые в данной работе параметры изменяются незначительно, но даже этого достаточно, чтобы нарушать его ламинарность [10].

В итоге в соответствии с поставленной целью была разработана трехмерная геометрическая модель аэродинамической трубы в среде *SOLIDWORKS*. На основе созданной модели выполнено численное моделирование воздушного потока с использованием программного комплекса *SOLIDWORKS Flow Simulation*.

В процессе моделирования были заданы необходимые граничные условия, определены параметры расчетной области и выполнен анализ характеристик потока. Исследования дали возможность измерить аэродинамические силы и моменты, определить местные скорости течения воздуха и углы примыкания потока, изучить распределение давления по поверхности. Проведенный эксперимент в аэродинамической трубе позволил наблюдать действительную картину обтекания и способствовал уточнению рассчитанных аэродинамических характеристик на предшествующих этапах проектирования.

Список литературы

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1991. – 600 с.

2. Бюшгенс, Г.С. Аэродинамика самолета: динамика продольного и бокового движения / Г.С. Бюшгенс, Р.В. Студнев. – М. : Машиностроение, 1979. – 352 с.

3. Лыков, А.В. Теория теплопроводности : учебное пособие для студентов теплотехнических специальностей высших учебных заведений. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

4. Лебедев, А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.

5. Лебедев, А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. – М. : Радио и связь, 1989. – 222 с.

6. Моллер, А.Б. Концепция построения современных моделей прокатки на сортовых станах / А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.С. Лимарев, Д.В. Назаров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – № 1(17). – С. 64–67.

7. Терентьева, Е.В. Анализ и выбор архитектуры нейронной сети для моделирования качества смеси сырья / Е.В. Терентьева, Ю.А. Извеков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2024 года. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 332.

8. Торшина, О.А. Математическое моделирование процесса теплопроводности в металлургическом производстве / О.А. Торшина, Н.А. Плугина, К.О. Светус // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 5(167). – С. 197–200.

9. Торшина, О.А. Применение теории конструкционного риск-анализа к определению влияния окалины на нагрев заготовок в печах и их качество / О.А. Торшина, Л.В. Смирнова, К.О. Светус // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 4(166). – С. 55–58.

10. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1. – М. : Мир, 1991. – 502 с.

11. Torshina, O.A. Mathematical modeling and visualization of the dynamics of immune reactions / O.A. Torshina, E.A. Moskvina, K.O. Svetus // Science and Business: Ways of Development. – 2024. – № 2(152). – P. 28–31.

References

1. Abramovich, G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika. – 5-ye izd., pererab. i dop. – M. : Nauka, 1991. – 600 s.

2. Byushgens, G.S. Aerodinamika samoleta: dinamika prodol'nogo i bokovogo dvizheniya / G.S. Byushgens, R.V. Studnev. – M. : Mashinostroyeniye, 1979. – 352 s.

3. Lykov, A.V. Teoriya teploprovodnosti : uchebnoye posobiye dlya studentov teplotekhnicheskikh spetsial'nostey vysshikh uchebnykh zavedeniy. – M. : Vysshaya shkola, 1967. – 599 s.

4. Lebedev, A.N. Modelirovaniye v nauchno-tekhnicheskikh issledovaniyakh. – M. : Radio i svyaz', 1989. – 224 s.

5. Lebedev, A.N. Modelirovaniye v nauchno-tekhnicheskikh issledovaniyakh. – M. : Radio i svyaz', 1989. – 222 s.

6. Moller, A.B. Kontseptsiya postroyeniya sovremennykh modeley prokatki na sortovykh stanakh / A.B. Moller, O.N. Tulupov, A.S. Limarev, D.V. Nazarov // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2007. – № 1(17). – S. 64–67.

7. Terent'yeva, Ye.V. Analiz i vybor arkhitektury neyronnoy seti dlya modelirovaniya kachestva smesi syr'ya / Ye.V. Terent'yeva, YU.A. Izvekov // Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya : tezisy dokladov 82-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Magnitogorsk, 22–26 aprelya 2024 goda. – Magnitogorsk : Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova, 2024. – S. 332.

8. Torshina, O.A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa teploprovodnosti v metallurgicheskom proizvodstve / O.A. Torshina, N.A. Plugina, K.O. Svetus // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 5(167). – S. 197–200.

9. Torshina, O.A. Primeneniye teorii konstruktsionnogo risk-analiza k opredeleniyu vliyaniya okaliny na nagrev zagotovok v pechakh i ikh kachestvo / O.A. Torshina,

L.V. Smirnova, K.O. Svetus // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 4(166). – S. 55–58.

10. Fletcher, K. Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkostey. T. 1. – M. : Mir, 1991. – 502 s.

© О.А. Торшина, К.О. Светус, В.И. Горбатов, А.Ф. Мустафин, 2026

УДК 004

С.Б. КАРИМОВ, О.В. ВОРОНКОВА
ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОД ТРАЕКТОРИЮ ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯ ВМЕСТО ЕГО ТЕКУЩЕЙ ФОРМУЛИРОВКИ

Ключевые слова: адаптивная архитектура; архитектурный долг; банковские информационные системы; радиус воздействия; совокупная стоимость владения (***TCO***); траектория изменения требований.

Аннотация. Современные банковские информационные системы (**БИС**) проектируются в условиях существенной изменчивости внешних требований, включая нормативные положения, стандарты финансового обмена сообщениями, такие как *ISO* 20022, требования в сфере противодействия отмыванию денег и финансированию терроризма (*AML*/*CFT*), а также расширяющийся набор цифровых каналов. В рамках статьи будет рассмотрено расхождение между практикой проектирования архитектуры под текущую версию требований и объективной необходимостью учитывать ожидаемую траекторию их изменения при принятии архитектурных решений. Цель исследования состоит в определении влияния ориентации на траекторию изменения требований на устойчивость архитектуры и совокупную стоимость владения банковскими платформами (***TCO***). Методы включают сравнительный анализ архитектурных подходов, сценарное моделирование и систематический обзор научной литературы. Результаты показывают, что проектирование под текущую версию требований снижает начальные капитальные затраты, однако приводит к накоплению архитектурного долга и быстрому росту операционных расходов. Предлагаемая модель оценки архитектурных решений использует метрику радиуса воздействия и прогноз *TCO* на период от пяти до десяти лет, что позволяет обосновать выбор адаптивного архитектурного подхода. Результаты имеют практическое значение для системных архитекторов, руководителей технологических подразделений банков и разработчиков основных банковских систем.

Введение

Банковские информационные системы работают в условиях постоянных изменений нормативных и технических требований. В период с 2020 по 2026 гг. нормативная среда финансового сектора существенно изменилась. В марте 2023 г. *SWIFT* и несколько инфраструктур финансового рынка начали поддерживать стандарт *ISO* 20022 посредством сообщений *MX*, что стало началом многолетней глобальной миграции [1]. Одновременно в апреле 2026 г. *FinCEN* и регуляторы США приступили к масштабному пересмотру требований к программам *AML*/*CFT*, сместив акцент с формального выполнения контрольных перечней на риск-ориентированную оценку результативности [2]. Стандарт *ISO* 20022 уже заменил прежние национальные форматы в 70 странах. Согласно прогнозам, к концу 2025 г. через него должно было обрабатываться 80 % объема и 90 % стоимости платежей на крупные суммы в мире [3].

Одновременно *IDC Financial Insights* сообщила, что в 2022 г. мировые финансовые организации потратили 36,7 млрд долл. США на сопровождение устаревших платежных систем. По прогнозу, к 2028 г. эта сумма должна достигнуть 57 млрд долл. США [4]. Отраслевые исследования показывают, что банки систематически недооценивают фактическую совокупную стоимость владения устаревшими системами. В среднем реальные расходы в 3,4 раза превышают первоначально запланированные бюджеты [5]. Это расхождение указывает на

Таблица 1. Классификация групп требований в банковских информационных системах по частоте и предсказуемости изменений (подготовлено авторами на основе [1; 2; 3; 9])

Группа требований	Примеры	Средняя частота изменений	Предсказуемость траектории	Индекс архитектурной нагрузки
Нормативные требования *AML/CFT*	*BSA,* 6*AMLD EC,* проекты нормативных актов *FinCEN*	От 1 до 2 раз в год	Высокая	Высокий
Стандарты обмена сообщениями	*ISO* 20022 (*MX*), сообщения *SWIFT MT*	Крупные пересмотры каждые 3–5 лет	Высокая	Критический
Платежные услуги и каналы	*Open Banking, QR,* СБП, *FedNow*	От 2 до 4 раз в год	Средняя	Высокий
Эксплуатационная нагрузка	Пиковые объемы транзакций, рост клиентской базы	Непрерывный рост	Средняя	Средний
Бизнес-требования	Изменения продуктов, тарификация	От 4 до 6 раз в год	Низкая	Средний

существенный недостаток методологии архитектурного проектирования. Решения ориентируются на текущее состояние требований, то есть на подход *Design for Current State*, тогда как платформы эксплуатируются от 10 до 20 лет в условиях постоянного нормативного и функционального давления.

Пробел в исследованиях связан с недостаточной разработанностью формализованных подходов, которые учитывают ожидаемую траекторию изменения требований при выборе архитектурных решений для банковских систем. Существующие методы сценарной оценки архитектуры, включая метод анализа архитектурных компромиссов *ATAM*, сосредоточены на текущих атрибутах качества системы [6], но не предлагают инструментов прогнозирования нормативной динамики на период от пяти до десяти лет.

Цель исследования – определить, как ориентация на ожидаемую траекторию изменения требований влияет на устойчивость архитектуры и *TCO* банковских информационных систем.

Гипотеза исследования основывается на предположении, что архитектура, спроектированная с учетом ожидаемой траектории изменения требований, при последующих модификациях системы обеспечивает меньший радиус воздействия и более низкую *TCO* при сроке эксплуатации от пяти лет по сравнению с подходом, ориентированным только на текущую версию требований.

Научный вклад: в исследовании разработан метод оценки архитектурных решений для банковских систем, который объединяет классификацию групп требований по частоте изменений, метрику радиуса воздействия и прогноз *TCO* на период от пяти до десяти лет.

Материалы и методы

Методологическая основа исследования объединяет взаимодополняющие подходы, выбранные с учетом характера изучаемого предмета, то есть архитектурных решений в условиях существенной изменчивости внешних требований. Сравнительный анализ основывался на принципе проектирования с учетом изменений *Design for Change* и принципе открытости и закрытости *Open-Closed Principle* [7]. Для двух противопоставленных подходов, проектирования под текущее требование (подход *A*) и проектирования с учетом траектории изменений (подход *B*), были формализованы следующие характеристики: начальные капитальные затраты *CapEx*, динамика операционных расходов *OpEx*, темп накопления архитектурного долга и радиус воздействия характерных изменений.

В сценарном моделировании использовался метод, адаптированный из сценарной оценки архитектуры [6]. Были рассмотрены четыре характерные ситуации для банковского сектора: 1) введение нового требования *AML*/*CFT*; 2) миграция на *ISO* 20022; 3) пятикратное уве-

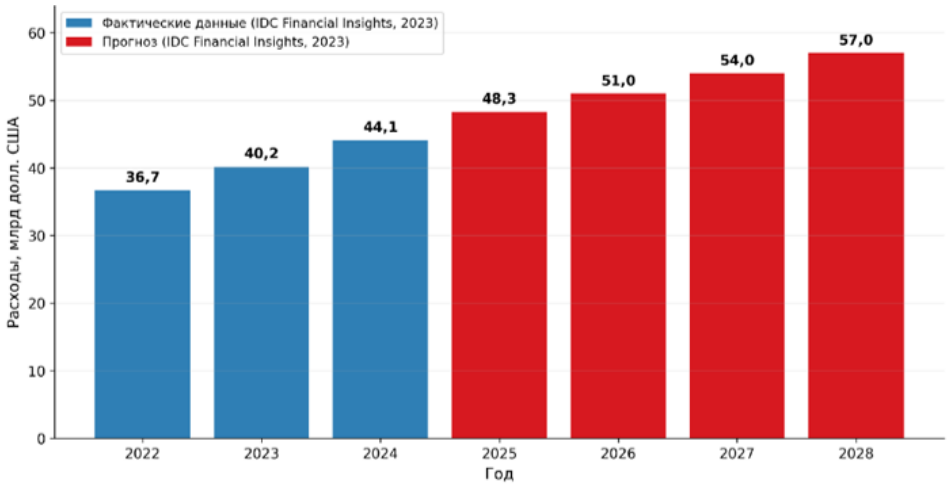


Рис. 1. Расходы мировых финансовых организаций на сопровождение устаревших платежных систем в период с 2022 по 2028 гг., млрд долл. США (подготовлено авторами на основе [4])

личение транзакционной нагрузки; 4) подключение новых цифровых каналов, включая *Open Banking* и мобильные экосистемы. Для каждого сценария оценивался радиус воздействия, определяемый как число компонентов системы, требующих модификации, а также качественно оценивался риск регрессии.

Анализ совокупной стоимости владения основывался на данных *IDC Financial Insights* [4] о фактических расходах финансовых организаций на сопровождение устаревших систем и на отраслевых данных о стоимости миграции основных банковских систем [5]. Прогноз *TCO* охватывал период от одного года до десяти лет, что соответствует характерному жизненному циклу корпоративной банковской платформы.

Результаты и обсуждение

До сравнения архитектурных подходов необходимо определить группы требований банковского сектора, для которых характерна высокая частота изменений и которые формируют нормативную нагрузку на архитектуру. В табл. 1 представлена предлагаемая классификация групп требований по темпу изменений.

Анализ показывает, что требования *AML/CFT* и стандарты обмена сообщениями создают существенную архитектурную нагрузку, при этом траектории их изменений относительно предсказуемы. Поэтому при проектировании расширяемых архитектурных границ этим группам требований следует отдавать приоритет.

Для характеристики масштаба накопления архитектурного долга при сопровождении устаревших банковских платформ были изучены статистические данные о расходах мирового финансового сектора. На рис. 1 показано изменение расходов мировых финансовых организаций на сопровождение устаревших платежных систем в период с 2022 по 2028 гг.

Данные *IDC Financial Insights* подтверждают системный характер проблемы. Средний годовой рост расходов на сопровождение устаревших систем составляет от 7 до 8 %. Прогнозируемое увеличение с 36,7 до 57 млрд долл. США в период с 2022 по 2028 гг. отражает рост стоимости обслуживания технического долга, а не расширение функциональности платформ [4]. Характерная миграция основной банковской системы занимает от трех до семи лет и стоит от 100 млн до 2 млрд долл. США [5].

Предлагаемый метод формализации траектории изменения требований включает три этапа. На первом этапе требования распределяются по группам, приведенным в табл. 1. На втором этапе каждой группе присваивается индекс скорости изменений *Change Velocity Index* (***CVI***) по шкале от 1 до 5. Значение 5 соответствует группам с выраженной динамикой изменений, включая *AML/CFT*. На третьем этапе компоненты архитектуры системы ранжируются по чувствительности к конкретной группе требований.

Радиус воздействия *Impact Radius* (***IR***) изменения требования формально определяется следующим образом: для заданного изменения требования *r* значение *IR* равно числу архитек-

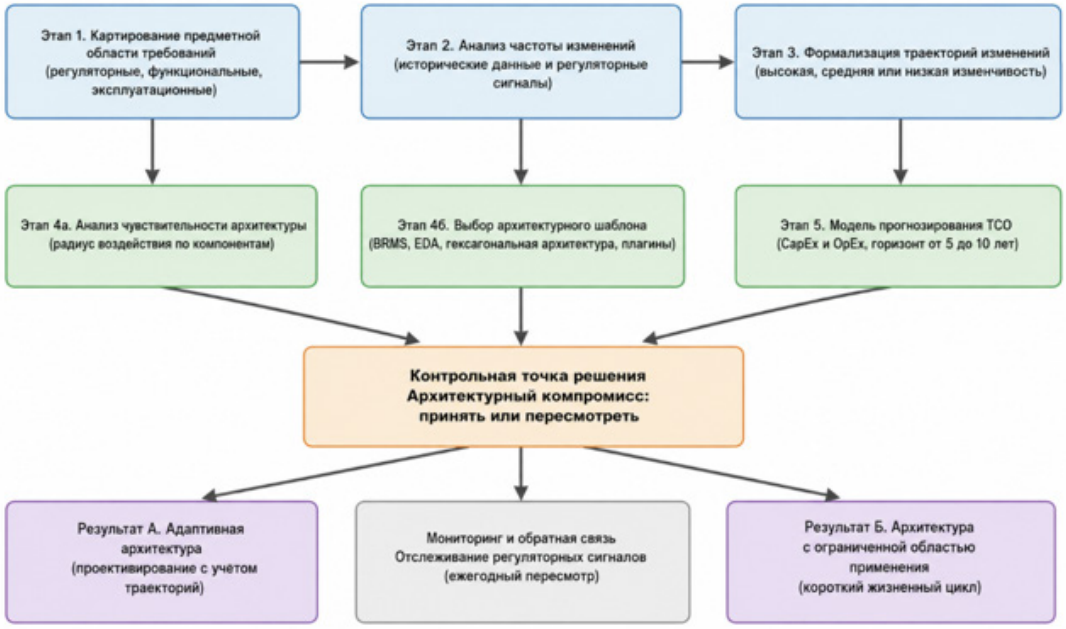


Рис. 2. Предлагаемая схема анализа траекторий изменения требований и выбора архитектурных решений для банковских систем (авторская разработка)

Таблица 2. Сравнительная оценка архитектурных подходов к проектированию банковских информационных систем (подготовлено авторами на основе [4; 5; 7–9])

Критерий оценки	Подход *A*: проектирование под текущее требование	Подход *B*: проектирование с учетом траектории изменений
Начальные затраты (*CapEx*)	Ниже, поскольку решение оптимизировано под действующие требования	Выше на 20–35 %, поскольку учитываются вложения в гибкость
Динамика операционных расходов (*OpEx*)	Быстрый рост, начиная с 3–5 года эксплуатации	Стабильный или умеренный рост на всем горизонте
Накопленная *TCO* за 10 лет	В 2,5–3,4 раза выше из-за *OpEx*	Ниже при сроке эксплуатации от 5 лет
Радиус воздействия (*IR*)	От 7 до 12 компонентов при характерном нормативном изменении	От 2 до 3 компонентов при сопоставимом изменении
Срок внедрения нового нормативного требования	От 3 до 9 месяцев, высокий риск регрессии	От 1 до 4 недель, изменения изолированы
Вероятность полной переработки	Высокая после 5–8 лет эксплуатации	Низкая при точном прогнозе траектории
Область применения	Системы с жизненным циклом до 3–4 лет	Платформы с жизненным циклом от 5 лет

турных компонентов C_i, которые необходимо модифицировать для реализации изменения. Для систем, построенных по подходу *B*, целевое значение *IR* при характерном нормативном изменении составляет два или три компонента.

На рис. 2 представлена предлагаемая схема анализа траекторий изменения требований и выбора архитектурных решений для банковских систем.

Метод предусматривает итеративное уточнение. Результаты мониторинга регуляторных сигналов ежегодно используются для проверки ожидаемой траектории и, при необходимости, для пересмотра архитектурных решений. Эта



Рис. 3. Динамика совокупной стоимости владения при двух архитектурных подходах на горизонте десяти лет, предлагаемая модель (подготовлено авторами на основе [4; 5])

характеристика отличает предлагаемый подход от статических методов оценки, которые применяются однократно на этапе проектирования [6].

Модель *TCO* является основным инструментом обоснования архитектурных решений в данном исследовании. Она прогнозирует накопленные затраты на разработку и эксплуатацию системы с учетом ожидаемой частоты изменений. В табл. 2 два подхода сопоставлены по архитектурным и экономическим критериям.

Табл. 2 демонстрирует, что вложения в архитектурную гибкость становятся экономически обоснованными приблизительно через период от четырех до пяти лет эксплуатации. Подход *A* сохраняет экономическую обоснованность для систем с коротким жизненным циклом. Для банковских платформ длительной эксплуатации подход *B* может снизить накопленную *TCO* в два или три раза.

На рис. 3 представлена предлагаемая модель динамики *TCO* двух подходов на горизонте десяти лет. По вертикальной оси показана накопленная совокупная стоимость в условных единицах, по горизонтальной оси указаны годы эксплуатации платформы.

График, отраженный на рис. 3, показывает пересечение кривых *TCO* в первые годы эксплуатации. После этой точки системы, построенные по подходу *A*, начинают формировать растущий операционный долг, тогда как системы, построенные по подходу *B*, сохраняют стабильный уровень затрат на каждое последующее изменение. К десятому году эксплуатации разница в накопленной *TCO* достигает величины, сопоставимой с полной стоимостью еще одной миграции платформы [5].

Для проверки теоретических выводов были рассмотрены четыре характерных сценария, отражающих реальные задачи банковской архитектуры.

Сценарий 1. Новое требование *AML/CFT*. В 2026 г. *FinCEN* предложило масштабный пересмотр требований к программам *AML/CFT*, предусматривающий переход от формального соблюдения «четырех столпов» к риск-ориентированной оценке результативности [2]. В системе, построенной по подходу *A*, такое требование инициирует изменение бизнес-логики в 9–12 модулях, включая обработку транзакций, профили клиентов, модуль оценки риска, отчетность и функции аудита. Срок внедрения составляет от трех до шести месяцев. В системе, построенной по подходу *B*, правила размещаются в отдельной системе управления бизнес-правилами *BRMS* и в конфигурационных профилях. Изменение затрагивает два компонента и реализуется в течение периода от двух до четырех недель. На рис. 4 сопоставлен радиус воздействия этого изменения при двух подходах.

Сценарий 2. Миграция на *ISO* 20022. На-



Рис. 4. Радиус воздействия нового требования *AML* при подходе *A*, монолитная архитектура, и подходе *B*, *BRMS* с модульной архитектурой (подготовлено авторами на основе [7])

Таблица 3. Рекомендуемые архитектурные шаблоны для групп требований с высоким *CVI* (подготовлено авторами на основе [7; 9; 10; 14; 15])

Группа требований	Рекомендуемый шаблон	Инструменты	Ожидаемый радиус воздействия
Правила *AML/CFT*	Система управления бизнес-правилами (***BRMS***)	*Drools, IBM ODM, Decision Engine*	От 1 до 2 компонентов
Стандарты обмена сообщениями (*ISO* 20022)	Абстрактный слой отображения данных, гексагональная архитектура	*Apache Camel*, специализированный слой адаптеров	От 1 до 2 компонентов
Платежные каналы (*Open Banking*)	*API*-шлюз, событийно-ориентированная архитектура	*Kong, Apigee; Apache Kafka*	От 2 до 3 компонентов
Эксплуатационная нагрузка	Микросервисы, облачное масштабирование	*Kubernetes*, горизонтальное автоматическое масштабирование подов	1 сервис, независимо
Бизнес-логика, продукты и тарификация	Архитектура плагинов, функциональные флаги	*Spring Boot* с сервисом конфигурации	От 2 до 4 компонентов

чиная с марта 2023 г. *SWIFT* перевела международные корреспондентские платежи в рамках *CBPR+* на формат *MX* [1; 12]. Системы с жестко заданной логикой разбора сообщений *MT* потребовали сквозной переработки шлюзов и слоев преобразования. При наличии в архитектуре абстрактного слоя отображения данных переход ограничивался заменой конфигурации отображения. Этот сценарий подтверждает значение принципа открытости и закрытости [7], согласно которому система должна быть открыта для расширения и закрыта для модификации.

Сценарий 3. Пятикратное увеличение транзакционной нагрузки. Монолитные системы с

тесно связанными компонентами демонстрируют нелинейный рост затрат на масштабирование. Вертикальное масштабирование ограничено мощностью оборудования, а горизонтальное требует существенных архитектурных изменений. В системах на основе микросервисов или событийно-ориентированной архитектуры *EDA* отдельные сервисы могут масштабироваться независимо, без изменения соседних компонентов [10].

Сценарий 4. Подключение новых цифровых каналов через *Open Banking*. Требования *PSD*2 в Европе и сходные инициативы в США и Азии обязывают банки предоставлять *API* сторонним поставщикам. Системы с выделенным *API*-шлюзом и слабо связанным интеграционным слоем могут подключить новый канал без изменения основной бизнес-логики [11; 13].

На основе сравнительного анализа и результатов сценарного моделирования в табл. 3 будут систематизированы архитектурные шаблоны для категорий требований, определенных в исследовании.

Предлагаемая система рекомендаций отличается от существующих методов оценки архитектуры тем, что она прямо связывает нормативную динамику с архитектурными шаблонами через количественную метрику радиуса воздействия. Такая связь позволяет архитекторам обосновывать техническое решение и представлять его руководству банка в категориях управления операционным риском и долгосрочных затрат.

Заключение

Исследование подтверждает сформулированную гипотезу. Архитектура, спроектированная с учетом ожидаемой траектории изменения требований, обеспечивает меньший радиус воздействия при последующих модификациях. Изменение затрагивает два или три компонента по сравнению с 7–12 компонентами при подходе *A*. При сроке эксплуатации свыше четырех-пяти лет такая архитектура также обеспечивает более низкую накопленную *TCO*.

Предлагаемый метод включает классификацию требований по индексу скорости изменений, применение метрики радиуса воздействия для количественной оценки чувствительности архитектуры к изменениям, прогноз *TCO* на период от пяти до десяти лет и набор рекомендуемых архитектурных шаблонов для каждой группы требований. В совокупности эти инструменты преобразуют архитектурные решения из интуитивных предпочтений в управляемые инженерные компромиссы. Цель исследования достигнута. Были определены группы требований банковского сектора с высокой частотой изменений, в частности требования *AML*/*CFT* и стандарты обмена сообщениями.

Практическая значимость результатов состоит в возможности их непосредственного применения системными архитекторами банков при обосновании решений целевой архитектуры, разработчиками основных банковских систем при проектировании расширяемого ядра платформ и руководителями ИТ при планировании стратегической модернизации ландшафта ИТ с учетом долгосрочной *TCO*. Подход также позволяет инвестиционному комитету банка количественно оценивать разницу между краткосрочной экономией *CapEx* и накоплением неконтролируемого операционного долга в среднесрочной перспективе.

Список литературы

1. Swift. ISO 20022 для финансовых организаций [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.swift.com/standards/iso-20022/iso-20022-financial-institutions-focus-payments-instructions.

2. Delaney, T.J. Предлагаемое правило FinCEN по AML/CFT: основные изменения для финансовых организаций и сведения для специалистов по комплаенсу / T.J. Delaney, J. Ziesman, B. Davies-Nyandebo. – Norton Rose Fulbright, 2026 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.nortonrosefulbright.com/en-us/knowledge/publications/fa891ed4/proposed-fincen-amlcft-rule-key-changes-for-financial-institutions.

3. ACI Worldwide. Руководство по переходу на ISO 20022: значение новых стандартов для платежей на крупные суммы и платежей в реальном времени [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.aciworldwide.com/how-to-migrate-to-iso-20022.

4. Zafin. Технический долг как риск для баланса, а не только проблема ИТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://zafin.com/banking-platform/insights/banking-blueprints/blogs/

technical-debt-balance-sheet-risk-banks.

5. Drozd, K. Основные банковские системы в 2026 году: полное руководство [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://crassula.io/solutions/core-banking/guides/what-is-core-banking.

6. Sahlabadi, M. Облегченная оценка программной архитектуры для промышленности: комплексный обзор / M. Sahlabadi, R.C. Muniyandi, Z. Shukur, F. Qamar // Sensors. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 1252.

7. Velepucha, V. Обзор микросервисной архитектуры: принципы, шаблоны и сложности миграции / V. Velepucha, P. Flores // IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 88339–88358.

8. Galster, M. Материалы 7-й Международной конференции ACM/IEEE по техническому долгу, TechDebt 2024, Лиссабон, Португалия, 14–15 апреля 2024 года / M. Galster, Z. Codabux, R.O. Spínola (ред.). – Association for Computing Machinery, 2024.

9. Lucas, J. Основные сложности и преимущества миграции на ISO 20022 / J. Lucas, E.Y. Global, J. Forman. – EY, 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ey.com/en_ee/insights/banking-capital-markets/understand-key-challenges-and-benefits-to-iso-20022-migration.

10. Maestro, A. Оценка масштабируемости микросервисной архитектуры банковских систем в публичном облаке / A. Maestro, N. Surantha // Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing : материалы 18-й Международной конференции по P2P, параллельным, грид-, облачным и интернет-вычислениям (3PGCIC 2023) / под ред. L. Barolli. – Springer, 2024. – (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Т. 189). – С. 103–115.

11. Li, R. Понимание эрозии программной архитектуры: систематическое картирование исследований / R. Li, P. Liang, M. Soliman, P. Avgeriou // Journal of Software: Evolution and Process. – 2022. – Т. 34. – № 3. – С. e2423.

12. Lucas, J. Девять аспектов миграции на ISO 20022 / J. Lucas, J. Forman. – EY, 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ey.com/en_gl/insights/banking-capital-markets/nine-considerations-for-iso-20022-migration.

13. IR Team. Руководство по миграции и внедрению ISO 20022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ir.com/guides/iso-20022-migration.

14. Stanford, C.S. Консультация для финансовых организаций: FinCEN и федеральные банковские агентства предлагают изменения правил программ AML/CFT / C.S. Stanford, B. Hester, A. Cooper, S. Harris. – Alston & Bird, 2026 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.alston.com/en/insights/publications/2026/04/fincen-banking-changes-aml-cft-rules.

15. Yulia, M. Фактическая стоимость устаревших систем: анализ модернизации банковских ИТ. – Digital Bank Expert, 2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://digitalbankexpert.com/2025/08/the-true-cost-of-legacy-systems-a-deeper-dive-into-banking-it-modernisation.

References

1. Swift. ISO 20022 dlya finansovykh organizatsiy [Electronic resource]. – Access mode : https://www.swift.com/standards/iso-20022/iso-20022-financial-institutions-focus-payments-instructions.

2. Delaney, T.J. Predlagayemoye pravilo FinCEN po AML/CFT: osnovnyye izmeneniya dlya finansovykh organizatsiy i svedeniya dlya spetsialistov po komplayensu / T.J. Delaney, J. Ziesman, B. Davies-Nyandebo. – Norton Rose Fulbright, 2026 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.nortonrosefulbright.com/en-us/knowledge/publications/fa891ed4/proposed-fincen-amlcft-rule-key-changes-for-financial-institutions.

3. ACI Worldwide. Rukovodstvo po perekhodu na ISO 20022: znacheniye novykh standartov dlya platezhey na krupnyye summy i platezhey v real'nom vremeni [Electronic resource]. – Access mode : https://www.aciworldwide.com/how-to-migrate-to-iso-20022.

4. Zafin. Tekhnicheskiy dolg kak risk dlya balansa, a ne tol'ko problema IT [Electronic resource]. – Access mode : https://zafin.com/banking-platform/insights/banking-blueprints/blogs/technical-debt-balance-sheet-risk-banks.

5. Drozd, K. Osnovnyye bankovskiye sistemy v 2026 godu: polnoye rukovodstvo [Electronic resource]. – Access mode : https://crassula.io/solutions/core-banking/guides/what-is-core-banking.

6. Sahlabadi, M. Oblegchennaya otsenka programmnoy arkhitektury dlya promyshlennosti:

kompleksnyy obzor / M. Sahlabadi, R.C. Muniyandi, Z. Shukur, F. Qamar // Sensors. – 2022. – T. 22. – № 3. – S. 1252.

7. Velepucha, V. Obzor mikroservisnoy arkhitektury: printsipy, shablony i slozhnosti migratsii / V. Velepucha, P. Flores // IEEE Access. – 2023. – T. 11. – S. 88339–88358.

8. Galster, M. Materialy 7-y Mezhdunarodnoy konferentsii ACM/IEEE po tekhnicheskomu dolgu, TechDebt 2024, Lissabon, Portugaliya, 14–15 aprelya 2024 goda / M. Galster, Z. Codabux, R.O. Spínola (red.). – Association for Computing Machinery, 2024.

9. Lucas, J. Osnovnyye slozhnosti i preimushchestva migratsii na ISO 20022 / J. Lucas, E.Y. Global, J. Forman. – EY, 2022 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.ey.com/en_ee/insights/banking-capital-markets/understand-key-challenges-and-benefits-to-iso-20022-migration.

10. Maestro, A. Otsenka masshtabiruyemosti mikroservisnoy arkhitektury bankovskikh sistem v publichnom oblake / A. Maestro, N. Surantha // Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing : materialy 18-y Mezhdunarodnoy konferentsii po P2P, parallel'nym, grid-, oblachnym i internet-vychisleniyam (3PGCIC 2023) / pod red. L. Barolli. – Springer, 2024. – (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. T. 189). – S. 103–115.

11. Li, R. Ponimaniye erozii programmnoy arkhitektury: sistematicheskoye kartirovaniye issledovaniy / R. Li, P. Liang, M. Soliman, P. Avgeriou // Journal of Software: Evolution and Process. – 2022. – T. 34. – № 3. – S. e2423.

12. Lucas, J. Devyat' aspektov migratsii na ISO 20022 / J. Lucas, J. Forman. – EY, 2022 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.ey.com/en_gl/insights/banking-capital-markets/nine-considerations-for-iso-20022-migration.

13. IR Team. Rukovodstvo po migratsii i vnedreniyu ISO 20022 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.ir.com/guides/iso-20022-migration.

14. Stanford, C.S. Konsul'tatsiya dlya finansovykh organizatsiy: FinCEN i federal'nyye bankovskiye agentstva predlagayut izmeneniya pravil programm AML/CFT / C.S. Stanford, B. Hester, A. Cooper, S. Harris. – Alston & Bird, 2026 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.alston.com/en/insights/publications/2026/04/fincen-banking-changes-aml-cft-rules.

15. Yulia, M. Fakticheskaya stoimost' ustarevshikh sistem: analiz modernizatsii bankovskikh IT. – Digital Bank Expert, 2025 [Electronic resource]. – Access mode : https://digitalbankexpert.com/2025/08/the-true-cost-of-legacy-systems-a-deeper-dive-into-banking-it-modernisation.

© С.Б. Каримов, О.В. Воронкова, 2026

УДК 004.89

А.В. МАНСУРОВ, Н.Н. МИНАКОВА, В.В. ЖУРАВЛЕВА, А.А. ЛЕПЕНДИН, А.П. ВАРАНКИН
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», г. Барнаул

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕТЕВОГО ТРАФИКА ЗАЩИЩЕННЫХ VPN-ПРОТОКОЛОВ

Ключевые слова: виртуальная частная сеть (***VPN***); защищенный сетевой трафик; искусственная нейронная сеть; классификация сетевого трафика.

Аннотация. Целью данной работы является разработка подхода к определению и классификации видов защищенной *VPN*-активности на основе гибридной нейросетевой архитектуры. Для достижения цели решены задачи анализа проблемного поля, формирования и подготовки наборов данных, формирования гибридной нейросетевой архитектуры, ее обучения и оценки качества разрабатываемого подхода. Использованы методы критического анализа, моделирования, статистической предобработки, а также методы обучения и оптимизации для искусственных нейронных сетей. Полученные результаты показывают, что обученная гибридная нейросетевая архитектура разрабатываемого подхода успешно идентифицирует как вид защищенного *VPN*-протокола, так и характер сетевой активности защищенного обмена. Средняя точность работы предлагаемого подхода для идентификации и классификации защищенного *VPN*-трафика составляет 0,9347 для «чистых» модельных примеров и 0,8453 для более реальных случаев с параллельной сетевой активностью. Отмечается влияние стороннего сетевого обмена на точность идентификации вида *VPN*-соединений и характера сетевой активности.

Введение

Обеспечение безопасной работы современных корпоративных сетей и корпоративной инфраструктуры предприятия во многом зависит от эффективности целого комплекса мер, связанных с оперативным контролем и мониторингом сетевой активности. Как известно, злоумышленники и нарушители активно используют инициированные из внутренней зоны корпоративной сети во внешний мир каналы связи для обхода корпоративных политик безопасности, формирования командно-управляющих соединений для своего вредоносного программного обеспечения и передачи конфиденциальных данных за пределы периметра корпоративной инфраструктуры. Применяемые для этого средства защиты информации, такие как межсетевые экраны следующего поколения и системы обнаружения вторжений, выполняют свою задачу и блокируют нежелательный сетевой обмен, используя для этого прежде всего классические методы анализа заголовков передаваемых сетевых структур или сигнатурную технологию глубокого анализа пакетов [1–2].

Обнаружение нежелательного обмена осложняется применением алгоритмов шифрования сетевого обмена и организацией для этих целей соединений виртуальных частных сетей (***VPN***) с последующей инкапсуляцией сетевого трафика. Многие *VPN*-протоколы используют распространенные транспортные протоколы и порты, например *TCP*/443, что позволяет внешне приблизить *VPN*-трафик к обычному защищенному веб-обмену. В некоторых решениях дополнительно применяются механизмы обфускации, направленные на скрытие характерных признаков *VPN*-туннеля: структуры начального обмена, повторяющихся шаблонов пакетов, особенностей рукопожатия и статистических характеристик соединения. Это затрудняет обнаружение *VPN* на основе простых правил, так как трафик может внешне напоминать легитимное *HTTPS*-соединение [3]. Современные реализации, такие как *Shadowsocks*, *V2Ray* и *XRay*, не являются *VPN* в строгом смысле, так как относятся к прокси-ориентированным технологиям, могут маскировать трафик под *HTTPS*-,

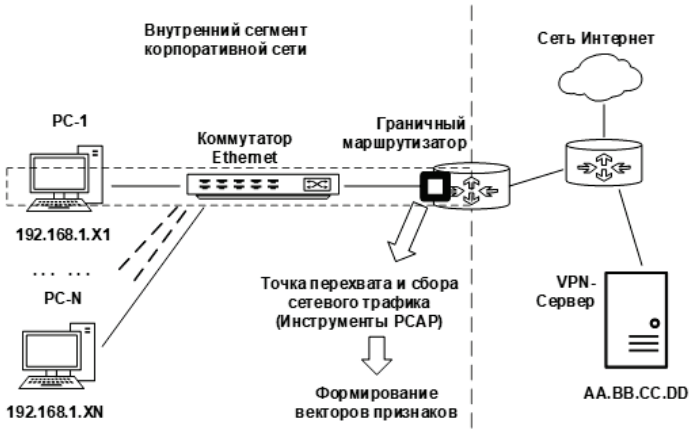


Рис. 1. Схема модельной сетевой конфигурации для имитации работы *VPN*-соединений и формирования собственного набора данных

HTTP/2-, *WebSocket*- или *QUIC*-соединения, что делает их внешне похожими на легитимный веб-трафик [12]. Уверенное обнаружение и идентификация такого сетевого взаимодействия на фоне общего анализируемого трафика выходят за пределы возможностей анализа сетевых заголовков передаваемых структур или поиска определенных сигнатур в сетевом обмене.

В настоящее время перспективным для решения подобных задач является применение алгоритмов машинного обучения и подходов с использованием искусственных нейронных сетей (**ИНС**) [5–7; 10; 12–13]. Они используют вычисляемые признаки сетевого потока и ориентируются на автоматическое извлечение информативных признаков из исходных или слабо обработанных данных. Наиболее успешными можно считать работы по применению в отдельности или в комбинации сверточных нейронных сетей (***CNN***) [13], многослойных персептронов (***MLP***), рекуррентных сетей (***RNN***) и сетей долгой краткосрочной памяти (***LSTM***) [5; 6; 10], а также двунаправленных *LSTM* (***BiLSTM***) [7; 12]. Во всех случаях авторами использовались уже готовые наборы данных *VPN-nonVPN dataset* (*ISCXVPN*2016) [8] или *CIC-VPN*2016 [9], для которых применялся открытый стандартный протокол *OpenVPN* и содержалось более 20 временных признаков в качестве входных векторов данных для перехваченного сетевого трафика с 14 различными маркированными категориями сетевого обмена. Авторы отмечают успешное применение разработанных ими алгоритмов для задач определения *VPN*- и не-*VPN*-трафика, а также для отдельной классификации видов сетевого обмена, позволяя достигать точности в пределах 80–95 %.

Представляет определенный интерес задача идентификации и классификации сетевого обмена с использованием современных *VPN*-решений, которые маскируют свой сетевой обмен под популярные прикладные протоколы. Для безопасности корпоративной инфраструктуры важно не только обнаружение факта использования защищенного *VPN*-туннеля, но и определение используемого *VPN*-протокола, а также вида передаваемой сетевой активности. В данной работе рассматривается разработка подхода для определения и классификации видов *VPN*-активности с использованием алгоритмов искусственных нейронных сетей.

Предлагаемый подход к определению и классификации видов *VPN*-активности

В ходе разработки предлагаемого подхода используется модельная сетевая конфигурация, имитирующая работу некоторой рабочей станции (**PC**) внутри периметра корпоративной сети, находящегося за пределами корпоративной сети условного *VPN*-сервера и точки сбора и анализа сетевого трафика на границе периметра корпоративной сети. Схема модельной конфигурации приведена на рис. 1.

Сетевой трафик для получения наборов данных генерировался с использованием единичной рабочей станции PC-1. *VPN*-соединения обеспечивались при помощи программного средства *Amnezia VPN*, серверная компонен-

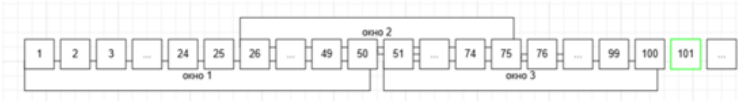


Рис. 2. Принцип формирования скользящих окон при обработке захваченного трафика

Таблица 1. Вычисляемые признаки отдельного сетевого пакета

Признак	Описание
Логарифм межпакетного интервала	Время между текущим и предыдущим пакетом, преобразованное с помощью логарифмической функции
Нормированная длина пакета	Длина пакета, приведенная к единому масштабу относительно максимального размера пакета
Направление передачи	Направление движения пакета: от клиента к серверу (0) или от сервера к клиенту (1)
Нормированный размер полезной нагрузки	Объем данных в пакете без учета служебных заголовков, приведенный к единому масштабу
Признак *TCP*	Указывает, относится ли пакет к *TCP*-трафику
Признак *UDP*	Указывает, относится ли пакет к *UDP*-трафику
Нормированный порт источника	Значение порта отправителя, приведенное к диапазону от 0 до 1
Нормированный порт назначения	Значение порта получателя, приведенное к диапазону от 0 до 1

та которого была развернута на персональном компьютере (**ПК**) «*VPN*-Сервер» под управлением ОС *Linux Ubuntu* 22.04. *VPN*-активность имитировалась с использованием пяти *VPN*-протоколов: *AmneziaWG*, *OpenVPN*, *Shadowsocks*, *WireGuard* и *XRay*. Дополнительно имитировались несколько сценариев сетевой активности для установленных с сервером *VPN*-соединений, а также для регулярного трафика от *IP*-адреса рабочей станции PC-1 к ресурсам глобальной сети Интернет:

– интерактивная работа (средства *Telnet* и *SSH*), метка *INTER*;

– веб-серфинг (короткие *HTTP*/*HTTPS*-запросы, загрузка страниц, изображений и вспомогательных ресурсов), метка *HTTP*;

– скачивание файлов (интенсивная передача данных, большое количество входящих и исходящих соединений, *torrent*-трафик), метка *DWNL*;

– видеостриминг (потоковая передача видео, устойчивый входящий трафик, периодическая загрузка видеофрагментов, *RuTube*), метка *VID*;

– видеозвонки (мультимедийный трафик с передачей аудио- и видеопотоков в реальном времени, *Yandex*.Телемост), метка *VCONF*.

При формировании набора данных каждый вид сетевой активности генерировался изолированно от других, таким образом, наложения разных видов сетевого трафика друг на друга в формируемом наборе данных не происходило. Захватываемый трафик записывался в *PCAP*-файлы с помощью инструментов библиотеки *PCAP* для последующей предобработки. Для учета последовательной структуры сетевого обмена в захваченном трафике выделяются скользящие окна фиксированного размера, равного 50 пакетам. Такой выбор согласуется с подходами ранней классификации сетевого трафика, где для анализа потока часто используются первые десятки пакетов, в том числе первые 50 пакетов, позволяющие получить представление фиксированной размерности без ожидания завершения соединения [4]. Следующее окно формируется с «нахлестом» в виде смещения на 25 пакетов относительно первого пакета предыдущего окна (рис. 2).

Эффективность анализа и последующей обработки сетевого трафика для определения

Таблица 2. Группы вычисляемых характеристических признаков скользящего окна

Группа признаков	Содержание
Размеры пакетов	Среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, медиана, процентили, межквартильный размах, асимметрия и эксцесс
Закономерности размеров	Энтропия размеров, доля малых пакетов, доля крупных пакетов
Межпакетные интервалы	Среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, медиана, процентили, коэффициент вариации, энтропия, автокорреляция
Направленность трафика	Соотношение пакетов и байтов по направлениям, доля исходящих пакетов
Временные характеристики	Длительность окна, количество пакетов в секунду, количество байтов в секунду
Полезная нагрузка	Доля пакетов без полезной нагрузки
Портовые признаки	Доля уникальных портов назначения, доля общеизвестных портов
TCP-флаги	Доли пакетов с флагами *SYN*, *ACK*, *FIN* и *RST*
Первые пакеты окна	Протокол и нормированный порт источника для первых трех пакетов окна

видов и характеров *VPN*-активности представляется возможным повысить, включив не только временные характеристики, но и статистические, а также характеристики отдельных пакетов. Для этого в окне для каждого пакета вычисляются признаки пакета (восемь признаков), что формирует в итоге матрицу признаков пакетов A размерностью 50×8. Для всего окна вычисляются характеристические признаки, которые образуют вектор B размерностью 52 элемента. Описания признаков для пакетов и окна приведены в табл. 1 и табл. 2.

После вычисления признаки матрицы A и вектора B проходят нормализацию. Им сопоставляются метки вида сетевой активности Y (вид *VPN*-протокола или его отсутствие – обычный сетевой трафик) и характера сетевой активности Z (метки, соответствующие интерактивной работе, веб-серфингу и т.п.).

Сформированный набор данных № 1 содержит 123 330 элементов (матрицы, векторы и метки), соответствующих комбинациям обычного трафика и *VPN*-трафика с различным содержимым. Каждый элемент набора данных включал в себя захват окнами анализа и вычисление признаков только одного определенного содержимого сетевого обмена, соответствующего либо обычному трафику, либо какому-то *VPN*-трафику с одной определенной сетевой активностью, без присутствия в окнах анализа постороннего сетевого трафика. В наборе сформированных данных включается равное количество элементов для пяти видов сетевой *VPN*-активности с пятью типами характера сетевой активности и в 2,5 раза больше элементов для сетевой не-*VPN*-активности (обычного трафика) с пятью типами характера сетевой активности (как поправка на превалирование обычного сетевого трафика над долей *VPN*-трафика). Этот набор данных соответствует идеальным модельным условиям захвата и анализа сетевого трафика от конкретного хоста.

Формирование набора данных № 2 происходит аналогично процессу формирования предыдущего набора данных, но в момент захвата сетевого трафика окнами анализа в них помимо целевого сетевого обмена включаются пакеты сетевого трафика параллельно работающего веб-браузера в режиме «размеренного» просмотра страниц веб-сайта (использовался веб-сайт *www.asu.ru*). Этот набор данных соответствует неидеальным, более близким к реальности условиям анализа сетевого обмена конкретного хоста, на котором одновременно работают несколько сетевых приложений, генерирующих трафик. Соответственно, вычисляемые в окнах признаки содержат некоторые отклонения от идеальных случаев для набора данных № 1.

Анализ предлагаемых решений в работах [5–7; 10; 12–13] показал, что *CNN* хорошо выделяет локальные признаки пакетов, но хуже учитывает временные зависимости. *LSTM* и *BiLSTM* эффективны при анализе последовательностей, однако не всегда учитывают обоб-

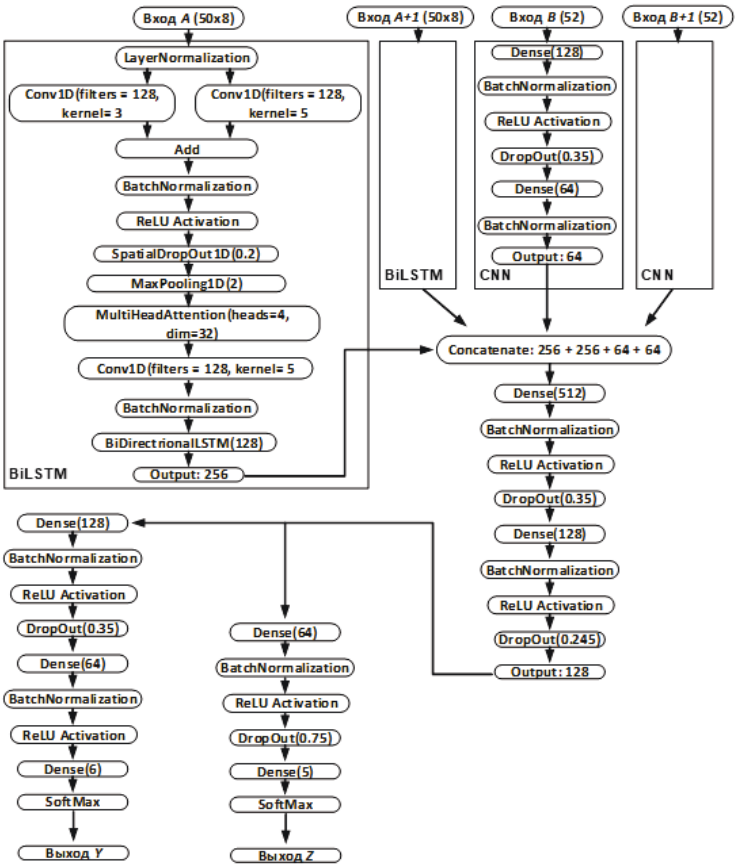


Рис. 3. Общая схема гибридной нейросетевой архитектуры

щенные статистические свойства окна. В соответствии со сказанным в качестве основы разрабатываемого метода используется гибридная нейросетевая архитектура, объединяющая *CNN* и *BiLSTM*. Сверточные слои *CNN* позволяют выделять локальные признаки в последовательности байтов и характеристик пакетов, то есть находить устойчивые фрагменты и шаблоны сетевого обмена. *BiLSTM*, в свою очередь, позволяет анализировать последовательность в двух направлениях и учитывать связи между предыдущими и последующими элементами внутри окна. Общая схема гибридной нейросетевой архитектуры приведена на рис. 3.

Матрицы признаков пакетов двух смежных окон A и $A + 1$ подаются на входы *BiLSTM*-составляющей нейросетевой архитектуры. В начале к входным данным применяется нормализация признаков, стабилизирующая значения на каждом временном шаге. После чего используется сверточный блок, состоящий из одномерных сверток с размерами ядер 3 и 5. Данный этап позволяет выделять локальные закономерности различной протяженности. Результаты сверточных операций объединяются, после чего применяются пакетная нормализация, исключение части признаковых карт и уменьшение длины последовательности с помощью операции максимального объединения. В качестве функции активации в сверточных и полносвязных слоях используется *ReLU* (1), которая проста в вычислении, что положительно влияет на скорость обучения:

$$ReLU(x) = max(0, x). \quad (1)$$

После сверточного блока применяется четырехголовый механизм внимания, позволяющий выделить более информативные участки последовательности и учитывать связи между пакетами внутри одного окна. В контексте анализа сетевого трафика данный механизм позволяет находить связи между пакетами внутри одного окна и выделять наиболее значимые участки сетевого обмена. После механизма внимания последовательность поступает в двуна-

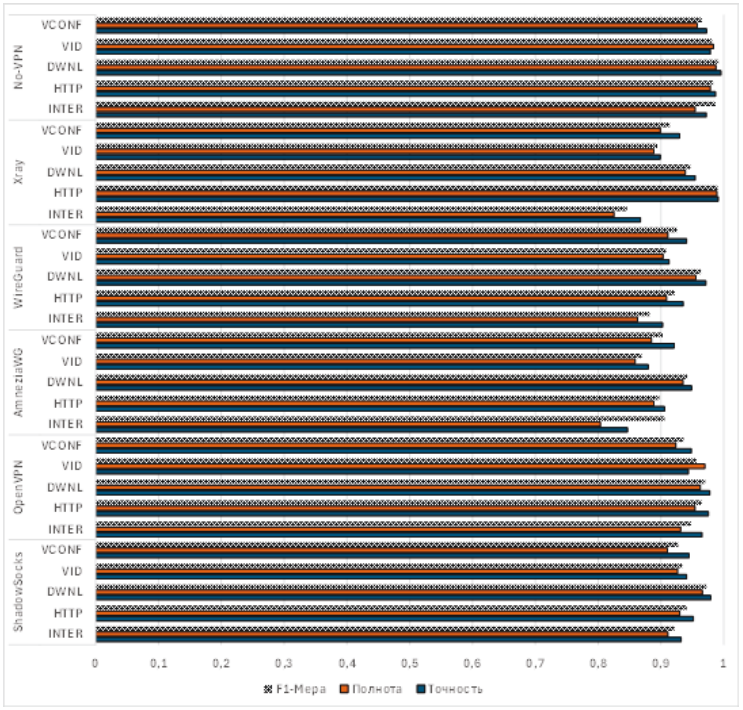


Рис. 4. Данные оценки качества работы нейросетевой архитектуры по результатам, полученным на тестовой выборке

правленный *LSTM*-слой, который анализирует последовательность в двух направлениях: от первого пакета к последнему и от последнего к первому. Вследствие этого модель учитывает как предшествующий, так и последующий контекст каждого элемента последовательности. В модели используется *LSTM*-слой со 128 нейронами, а результат работы преобразуется в единый вектор признаков, описывающий последовательность пакетов.

Статистические признаки двух смежных окон подаются в виде векторов B и $B + 1$ из 52 признаков на входы двух полносвязных блоков с постепенным уменьшением размерности, сначала до 128, потом до 64 параметров. В каждом блоке применяются полносвязный слой, пакетная нормализация, функция активации *ReLU* и исключение части нейронов на этапе обучения.

После обработки выполняется объединение полученных представлений. Далее используется общий полносвязный блок, задача которого состоит в формировании итогового скрытого представления. Данный блок включает в себя два полносвязных слоя с уменьшением размерности сначала до 512, затем до 128 признаков. В этих слоях также применяются пакетная нормализация, *ReLU* и исключение части нейронов.

Далее архитектура разделяется на две ветви, где первая ветвь предназначена для определения вида сетевой активности Y (вид *VPN*-протокола или его отсутствие), а вторая – характера сетевой активности Z. На выходе каждой классификационной ветви используется функция *Softmax* (2), преобразующая выходные значения нейронной сети в вероятности принадлежности объекта к каждому классу:

$$\mathrm{Softmax}(z_i) = \frac{e^{zi}}{\sum_{j=1}^{K} e^{zj}}, \qquad (2)$$

где z_i – значение на выходе i-го нейрона; K – количество классов.

В программной реализации гибридной нейросетевой архитектуры вес ошибки по активности равен 2,0, а вес ошибки по протоколу – 1,0. Также применяется сглаживание меток: 0,10 для выхода активности и 0,05 для выхода протокола. Данный прием снижает чрезмерную уверенность модели в предсказаниях и повышает устойчивость обучения.

Для настройки параметров используется алгоритм *Adam* со скоростью обучения 0,0005. Дополнительно применяется ограничение нормы градиента, что особенно важно для рекур-

Таблица 3. Осредненные метрики оценки качества работы нейросетевой архитектуры

Протокол	Точность	Полнота	*F*1-Мера
Тестовая выборка (набор данных № 1)			
Non-VPN	0,9813	0,9725	0,9769
OpenVPN	0,9623	0,9484	0,9551
ShadowSocks	0,9498	0,9288	0,9391
WireGuard	0,9327	0,9084	0,9204
XRay	0,9283	0,9083	0,9191
AmneziaWG	0,9004	0,8743	0,8871
Все *VPN*	0,9347	0,9136	0,9239
Тестовая выборка (набор данных № 2)			
Non-VPN	0,9283	0,9075	0,9178
OpenVPN	0,8823	0,8654	0,8742
ShadowSocks	0,8687	0,8418	0,8551
WireGuard	0,8357	0,8094	0,8223
XRray	0,8183	0,7826	0,8019
AmneziaWG	0,8204	0,7863	0,8031
Все *VPN*	0,8453	0,8178	0,8313

рентной части нейросетевых моделей. Ограничение резких изменений градиента делает обучение *LSTM*-слоя более устойчивым. В виде метрики качества для обоих выходов используется точность классификации.

Обучение и тестирование нейросетевой архитектуры

Для обучения нейросетевой архитектуры использовался сформированный набор данных № 1 (соответствующий идеальным модельным условиям анализа сетевого трафика), в котором для обучения использовалось 85 % (104 830 элементов), а для тестирования работы – 15 % (18 500 элементов) данных. В процессе обучения контролировались значения функции ошибки и точности классификации, при этом изменения функции ошибки и точности классификации, начиная со 100-й эпохи, были незначительными, вследствие чего обучение дальше не продолжалось. Дополнительное тестирование уже обученной нейросетевой архитектуры проводилось на тестовой выборке, сформированной из элементов набора данных № 2 (соответствующих условиям анализа трафика, приближенным к реальным) и содержащей 18 000 элементов.

Для оценки качества работы обученной нейросетевой архитектуры на этапе тестирования использовались основные метрики многоклассовой классификации: точность, полнота и *F*1-мера. Полные данные о результатах тестирования нейросетевой архитектуры на тестовой выборке из набора данных № 1 с детализацией по виду *VPN*-протокола и характеру сетевой активности приведены на рис. 4. В табл. 3 приведены осредненные показатели с разбиением по идентифицируемым *VPN*-протоколам для тестовых выборок из наборов данных № 1 и № 2.

Согласно полученным результатам тестирования, предлагаемая нейросетевая архитектура способна успешно идентифицировать *VPN*-соединения и обычный сетевой трафик, не относящийся к *VPN*, а также оценивать характер сетевого взаимодействия, определяя, какая именно сетевая активность происходит в

момент анализа. Архитектура успешно идентифицирует классические *VPN*-протоколы (такие как *OpenVPN* и *Shadowsocks*) и демонстрирует небольшую деградацию для более сложных протоколов *AmneziaWG* и *XRay*, ориентированных на маскировку и обфускацию своей работы.

Наиболее слабый результат, демонстрируемый для *VPN*-протокола *AmneziaWG*, можно объяснить особенностью работы данного протокола: подмешиванием случайных «мусорных» и *CPS*-пакетов на старте для имитации сторонних протоколов взаимодействия. Очевидно, что их попадание в «окна» анализа привносит случайность в процесс вычисления признаков, что делает процесс обучения для уверенного нахождения такого обмена более сложным. Ухудшение работы также отмечается и для случаев определения сетевой активности, соответствующей интерактивной работе (протоколы *SSH* и *Telnet*), что объясняется спорадичностью такой активности и соответствующими нестабильными признаками, вычисляемыми при обработке такого трафика. Для стабильных случаев плотного сетевого трафика, соответствующего скачиванию файлов или видеопотоков, нейросетевая архитектура показывает отличные результаты для каждого контекста (не-*VPN*-трафик и *VPN*-трафик).

В целом разработанная нейросетевая архитектура, являющаяся центром предлагаемого подхода к анализу сетевого трафика и идентификации *VPN*-активности, показывает убедительную точность 0,9347 для случаев идентификации *VPN*-соединений. Идентификация обычного (не-*VPN*) сетевого трафика осуществляется с точностью 0,9813, что соответствует нынешним трендам в точности и эффективности идентификации для предлагаемых нейросетевых алгоритмов.

Для тестовой выборки из набора данных № 2 результаты могут быть объяснены тем, что при вычислении входных признаков в окна обработки захваченного трафика попадали пакеты не только целевого, но и стороннего трафика, что ожидаемо приводит к изменениям вычисляемых признаков и впоследствии снижает точность и эффективность работы обученной нейросетевой архитектуры. Очевидно, что дальнейшая интенсификация постороннего сетевого обмена с анализируемого хоста будет приводить к еще большему снижению качества идентификации.

Заключение

В работе предложен подход для определения и классификации видов защищенной *VPN*-активности на основе нейросетевой архитектуры с комбинированным включением алгоритмов *CNN* и *BiLSTM*. Разработанный подход использует вычисляемые по перехватываемому сетевому трафику признаки, позволяет выполнять анализ и идентификацию сетевого обмена без расшифровывания полезной нагрузки сетевых пакетов. На выходе определяются пять популярных видов *VPN*-протоколов, некоторые из них обладают способностью к обфускации и маскировке своей работы под обычный сетевой обмен, а также идентифицируется характер сетевой активности внутри *VPN*-соединения. Подход при тестировании показывает хорошие результаты, которые согласуются с аналогичными результатами подобных исследований. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для задач мониторинга и анализа сетевой безопасности в корпоративных сетях.

Список литературы

1. Браницкий, А.А. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак / А.А. Браницкий, И.В. Котенко // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 45(2). – С. 207–244.

2. Горбатов, В.С. Кибербезопасность сетевого периметра объекта критической информационной инфраструктуры / В.С. Горбатов, И.Ю. Жуков, В.В. Кравченко, Д.И. Правиков // Безопасность информационных технологий. – 2022. – Т. 9. – № 4. – С. 12–26.

3. Канатьев, К.Н. Передовые методы обнаружения и обфускации VPN-трафика: углубленный анализ OpenVPN и его уязвимостей в современную цифровую эпоху / К.Н. Канатьев, М.Д. Нурмагомедов, А.А. Гребенщиков, Н.А. Каравцев, В.С. Станолевич // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 10. – С. 211–214.

4. Babaria, R.J. FastFlow: Early Yet Robust Network Flow Classification Using the Minimal Number of Time-Series Packets / R.J. Babaria, M. Lyu, G. Batista, V. Sivaraman // arXiv. – 2025.

5. Islam, F.U. A Deep Learning-Based Framework to Identify and Characterize Heterogeneous Secure Network Traffic / F.U. Islam, G. Liu, W. Liu, Q.M. ul Haq // IET Information Security. – 2023. – Vol. 17. – P. 294–308.

6. Parchekani, A. Classification of Traffic Using Neural Networks by Rejecting: A Novel Approach in Classifying VPN Traffic / A. Parchekani, S. Nouri, V. Shah-Mansouri, S.P. Shariatpanahi. – 2021. – 6 p.

7. Tawfeeq, T.M. Adversarial Training for Improved VPN Traffic Classification Using EfficientNet-B0 and Projected Gradient Descent / T.M. Tawfeeq, M. Nickray // International Journal of Intelligent Engineering and Systems. – 2025. – Vol. 18. – No. 1. – P. 1200–1215.

8. VPN 2016 | Datasets | Research | Canadian Institute for Cybersecurity | UNB [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.unb.ca/cic/datasets/vpn.html.

9. VPN and Non-VPN Application Traffic (CIC-VPN2016) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.kaggle.com/datasets/noobbcoder2/vpn-and-non-vpn-application-traffic-cic-vpn2016.

10. Yifter, N. Mobile Traffic Classification Over VPN: Evaluating Encrypted Traffic Classification Techniques on VPN Traffic: A Comparative Study : master's thesis / N. Yifter, H. Ghalayini. – Gothenburg : Chalmers University of Technology, University of Gothenburg, 2025. – 65 p.

11. Začs, A. Analysis of VPN Obfuscation Methods / A. Začs ; науч. рук. J. Revzina // Research and Technology – Step into the Future : материалы научно-практической конференции RaTSif. – Riga : Transport and Telecommunication Institute, 2024. – 2 p.

12. Zhao, H. CTCRNN: A Hybrid CNN-BiLSTM Based Classification Method for Industrial IoT Encrypted Traffic Based on Spatiotemporal Features / H. Zhao, S. Sun, R. Wang, F. Fan, L. Liu // 2024 3rd International Conference on Cyber Security, Artificial Intelligence and Digital Economy (CSAIDE 2024), Nanjing, China, March 01–03, 2024. – New York : ACM, 2024. – 6 p.

13. Zhu, P. An Encrypted Traffic Identification Method Based on Multi-Scale Feature Fusion / P. Zhu, G. Wang, J. He, Y. Dong, Y. Chang // Array. – 2024. – Vol. 21. – P. 100338.

References

1. Branitskiy, A.A. Analiz i klassifikatsiya metodov obnaruzheniya setevykh atak / A.A. Branitskiy, I.V. Kotenko // Trudy SPIIRAN. – 2016. – № 45(2). – S. 207–244.

2. Gorbatov, V.S. Kiberbezopasnost' setevogo perimetra ob"yekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury / V.S. Gorbatov, I.YU. Zhukov, V.V. Kravchenko, D.I. Pravikov // Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy. – 2022. – T. 9. – № 4. – S. 12–26.

3. Kanat'yev, K.N. Peredovyye metody obnaruzheniya i obfuskatsii VPN-trafika: uglublennyy analiz OpenVPN i yego uyazvimostey v sovremennuyu tsifrovuyu epokhu / K.N. Kanat'yev, M.D. Nurmagomedov, A.A. Grebenshchikov, N.A. Karavtsev, V.S. Stanolevich // Innovatsii i investitsii. – 2023. – № 10. – S. 211–214.

8. VPN 2016 | Datasets | Research | Canadian Institute for Cybersecurity | UNB [Electronic resource]. – Access mode : https://www.unb.ca/cic/datasets/vpn.html.

9. VPN and Non-VPN Application Traffic (CIC-VPN2016) [Electronic resource]. – Access mode : https://www.kaggle.com/datasets/noobbcoder2/vpn-and-non-vpn-application-traffic-cic-vpn2016.

© А.В. Мансуров, Н.Н. Минакова, В.В. Журавлева, А.А. Лепендин, А.П. Варанкин, 2026

УДК 004.056.53

М.А. СИДОРОВИЧ, С.А. ПРИХОДЬКО, М.А. ПОПОВ, Ю.В. ПОНОМАРЧУК
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск

О ЗАЩИТЕ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЯГИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА

Ключевые слова: кибератаки; кибербезопасность; оценка ущерба; радиосвязь; распределенная тяга; интеллектуальные транспортные системы; *BER; DMR; Locotrol; SDR*.

Аннотация. В статье рассмотрены ключевые атаки на интеллектуальные системы распределенной тяги, построенные на основе радиосвязи. Проблема усугубляется широким распространением программно-определяемого радио (***SDR***), создающего новые риски для кибербезопасности критически важных транспортных систем. Целью исследования являлось выявление зон риска для систем распределенной тяги. Выполнено моделирование системы обеспечения цифровой радиосвязью стандартов, применяемых на железнодорожном транспорте. Для подобной системы проанализированы варианты реализации распространенных атак на основе программно-определяемого радио. Экспериментально подтверждено, что атаки с использованием *SDR* способны нарушать целостность и доступность радиосвязи, вызывая потенциально опасные ситуации на железнодорожном транспорте, однако предложенные в статье решения позволяют снизить возможные риски.

Введение

В современных системах железнодорожного транспорта интеллектуальные системы управления движением поездов играют ключевую роль в повышении эффективности и безопасности транспортных процессов. Они обеспечивают точное и синхронизированное управление, критически важное для своевременной оптимизации графика движения и уменьшения времени ожидания. Поэтому защищенность таких систем от компьютерных атак является ключевым фактором обеспечения безопасности и эффективности организации управления движением поездов. Даже кратковременное снижение качества работы интеллектуальных систем может привести к серьезным последствиям для транспортной системы.

На железных дорогах США, КНР, ЮАР, Австралии и других стран широкое распространение получили системы ведения тяжеловесных поездов, которые используют цифровые протоколы коммуникации для обеспечения непрерывной передачи информации. Система *Locotrol* и ее аналоги получили широкое распространение. Она представляет собой технологию, направленную на повышение эффективности и пропускной способности железнодорожного транспорта. Основная идея этой системы заключается в создании условий для автоматизации управления тяжеловесными поездами, что достигается путем точной координации их движения с использованием передовых протоколов связи. Также значимой задачей данной системы является эффективное распределение мощности локомотива для ускорения и торможения по всему поезду. Принцип работы *Locotrol* представлен на рис. 1 [1].

Литературный обзор

Применение систем удаленного автоматизированного управления подвижными составами неизбежно приводит к увеличению нагрузки на радиосеть, поскольку для координации движения поездов требуется обмен большими объемами данных в реальном времени. Накладные телекоммуникационные расходы включают передачу информации о скорости, местоположении, траектории движения и других критически важных параметрах движения, при этом обмен данными выполняется как между поездами и



Рис. 1. Схема применения системы *Locotrol* [1]



Рис. 2. Схема применения радиоканала для систем типа «*Locotrol*»

диспетчерскими центрами, так и между транспортными средствами и объектами инфраструктуры. Принципы организации системы распределенной тяги, представленные в источнике [2], подразумевают, что качество и доступность радиосвязи являются ключевыми факторами для интервального регулирования поездов. Надежность передачи данных напрямую влияет не только на безопасность и непрерывность движения транспортных средств в этом случае, но и на такие важные факторы, как скорость и сроки доставки грузов и пассажиров, трудоемкость и себестоимость перевозок, а также затраты на эксплуатацию систем [3].

В работе [4] представлена уязвимость в системе передачи команд управления тормозной системой, которая связана с отсутствием надежной аутентификации в протоколе радиосвязи между различными системами управления тормозной системой поезда и позволяет с помощью систем любительского радио на программно-определяемых системах (***SDR***) подавать ложные команды системам управления тормозами. Данная уязвимость затрагивает широкий круг производителей систем железнодорожной автоматизации и управления. Ее эксплуатация при реализации атаки может привести к несанкционированной остановке поезда, нарушению работы тормозной системы или даже к дестабилизации национальной железнодорожной сети. Уязвимость оценивается как имеющая высокий уровень риска: базовый балл *CVSS v*3 равен 8.1 (вектор: *AV*:*A*/*AC*:*L*/*PR*:*N*/*UI*:*N*/*S*:*U*/*C*:*N*/*I*:*H*/*A*:*H*).

Рассмотрим сценарий атаки на физический уровень системы *Locotrol* средствами *SDR*, который сформирован в соответствии с [5]. Объектом атаки является радиоканал системы между ведущими и ведомыми локомотивами. Передача телеметрических данных происходит по радиоканалу, что создает риск кибератак непосредственно через канал связи. Термин «вторжение в эфир» обозначает технический захват эфира радио- и телевещания. К сожалению, случаи таких атак не являются редкостью и входят в арсенал киберпреступников по всему миру.

Обычно передача телеметрических данных для связи ведомого и ведущего локомотивов осуществляется с помощью радиомодемов различных стандартов. Применение радиоканала для систем распределенной тяги схематично представлено на рис. 2.

Помимо цифровой радиосвязи, в устройствах также применялись стандарты аналоговой

Таблица 1. Стандарты радиосвязи, применяемые на железнодорожном транспорте

Стандарт	Применение	Риски
• *Motorola* (*VHF, UHF*) • *ICOM/SRI* (*UHF, VHF*)	Управление процессом перевозок	Аналоговая система управления процессом перевозок, не имеет средств шифрования
Цифровая радиосвязь (160 или 220 МГц)	Диспетчерское управление процессом перевозок и организация сбора телеметрической информации	Цифровая система с шифрованием *RC*4
GSM-R ~ 920 *MHz*	Диспетчерское управление процессом перевозок и организация сбора телеметрической информации	Цифровая система с шифрованием *Triple-DES*
CARS 827 *MHz*	Организация межмашинного взаимодействия	Отдельный модуль шифрования отсутствует, возможно включение аппаратных и программных средств шифрования трафика

Таблица 2. Средства моделирования различных систем

Система	Назначение
ОС *FreeDOS*	Операционная система
*GNS*3	Увязка информационных систем в единую моделируемую систему
Serial port	Соединение *FreeDOS* – виртуальный *COM MatLab*
Kali Linux	Моделирование объекта «злоумышленник»
MatLab, Simulink	Среда для создания модели радиоканала

радиосвязи с частотной модуляцией и проприетарные протоколы передачи данных на основе квадратурной *QPSK*-модуляции, которые представлены в табл. 1.

Применение стандартов, не включающих механизмы защиты информации, как показывает обзор литературы, может привести к эксплуатации злоумышленниками уязвимости, которая заключается в наличии открытых портов и работающих сервисов компонентов автоматизированных систем. Такие уязвимости могут позволить неавторизованным пользователям подключаться к системе и получать доступ к защищаемой информации.

Материалы и методы

Реализация подобной атаки требует проведения предварительной радиоразведки, поскольку злоумышленникам необходима исходная информация об особенностях системы, что для проприетарных протоколов весьма существенно из-за небольшого количества информации о них. В ходе пассивной фазы атаки на протокол *SDR* радиоприемники позволяют зафиксировать рабочие частоты, требуемую полосу пропускания, тип модуляции и стандарт радиосвязи.

На основе данных радиоразведки формируется методология активной фазы атаки. Для физического уровня модели *OSI* отмечаются два основных типа активных атак на физический уровень радиосети: глушение (*jamming*) и подмена (*tampering*) [6]. Если глушение приводит к простой блокировке канала, то подмена позволяет реализовать атаку «человек посередине» (*Man-in-the-Middle* – ***MITM***). Для моделирования активной атаки был разработан стенд на ос-

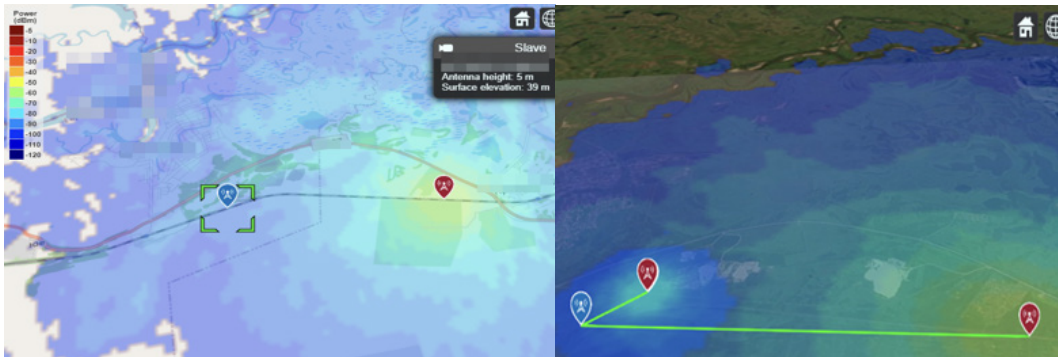


Рис. 3. Результаты моделирования дальности радиоразведки (слева) и активных атак (справа)

Таблица 3. Уровни сигналов от *HackRF* и передатчика *Locotrol*

Система	*HackRF*			*Locotrol*
Дальность, м	250	500	750	1 500
Уровень сигнала, *dBm*	–65,8	–77,5	–84,7	–68,6

нове знаний и опыта работы с реальными системами, входящими в состав «*Locotrol*». Средства моделирования для проведения компьютерного эксперимента представлены в табл. 2.

Экспериментально оценить возможность атаки на физический уровень телекоммуникационной инфраструктуры можно с помощью *SDR*, воздействуя на подсистему радиосвязи в различных диапазонах. Для этого проведен анализ распространения радиоизлучения при радиообмене между ведущим и ведомым поездами на участке в среде *Matlab*. Анализ распространения сигнала в соответствии с моделью Лонгли – Райса с учетом рельефа местности и минимального уровня чувствительности наиболее популярного средства *SDR HackRF One* (–100 *dBm*) представлен на рис. 3.

Результаты

В условиях открытых пространств при радиообмене между ведущим и ведомыми поездами дальность, на которой может быть выполнена радиоразведка, составляет до 7,2 км. Анализ применения представленного радиосредства для активных атак показал, что дальность действия *HackRF* при мощности передачи 0,01 Вт составляет около 100 м. Именно на таком расстоянии уровень его сигнала будет сопоставим с уровнем сигнала передатчика радиомодема мощностью 2,5 Вт, находящегося на расстоянии 1,5 км [7]. Результаты приведены в табл. 3. В связи с этим для передачи данных, напрямую влияющих на безопасность движения поездов, необходимо применение средств радиопередачи с защищенным помехоустойчивым протоколом [8].

Модуляция 4-*FSK*, используемая в системах цифровой радиосвязи, отличается высокой устойчивостью к злонамеренному глушению. В процессе экспериментального исследования после завершения этапа модуляции сигнала был предпринят следующий шаг, заключавшийся в добавлении аддитивного белого гауссовского шума (***AWGN***) с соотношением сигнал/шум 12 дБ. Кроме того, к сигналу был добавлен импульсный нормализованный шум, сгенерированный для имитации преднамеренного зашумления канала. Затем выполнены вычисление количества битовых ошибок и расчет *BER*, а также сравнение полученного значения с интерполированным значением *BER* для идеального случая. Зависимость показателя битовой ошибки на базе модели распространения сигнала Лонгли – Райса представлена на рис. 4.

При радиусе радиоразведки 7,2 км систе-

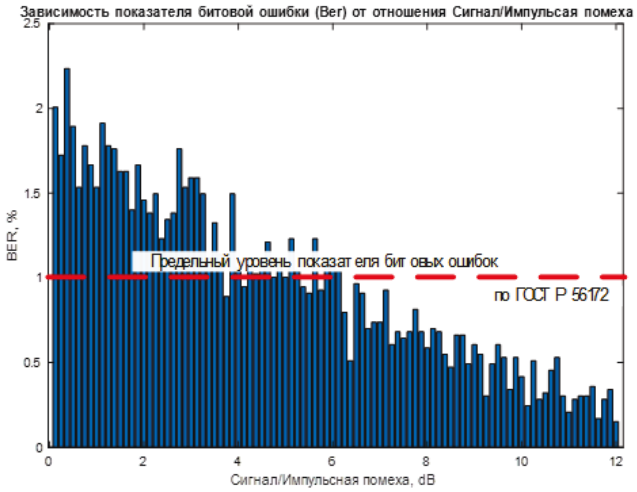


Рис. 4. Зависимость показателя битовой ошибки на базе модели распространения сигнала Лонгли – Райса

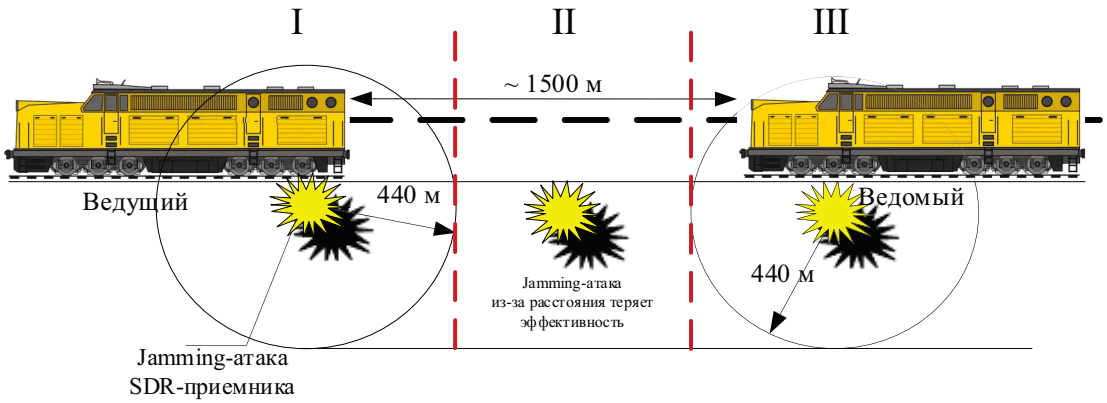


Рис. 5. Атака глушением на систему «*Locotrol*»

ма *Locotrol* будет находиться в пределах чувствительности систем класса *HackRF* в течение 6,2 минуты, что определяет временное окно для проведения активной атаки. Поэтому с учетом предельного уровня *SNR* радиус воздействия составляет 440 м, что соответствует расстоянию 880 м или 45,25 секунды для проведения активной атаки на радиоканал, как показано на рис. 5.

Однако длительность 45,25 с составляет время атаки на каждый локомотив, что повышает эффективность вторжения. Зазор в точке *II* на рис. 5 обозначает позицию, в которой эффективность *jamming*-атаки на радиоканал низка из-за большого расстояния и неспособности *SDR*-передатчика приблизиться к уровню, необходимому для провокации сбоя радиосвязи. При расстоянии между ведущим и ведомым поездами, равном 1,5 км (около 100 грузовых вагонов), зазор составит 620 м. Поезд со скоростью 70 км/ч пройдет этот участок за 32 с, что меньше принятого в системе *Locotrol* времени восстановления радиосвязи, которое составляет 45 с. Таким образом, суммарное время воздействия на поезд будет складываться из времени воздействия на ведущий и ведомый локомотивы, а также технологического зазора, составляющего 122,2 с.

Обсуждение

Исходя из времени задержки, система *Locotrol* переведет ведомый локомотив в режим холостого хода (*Idle mode*), и управление тормо-

зами будет осуществляться только по давлению в тормозной магистрали. В грузовых составах применение систем электропневматического торможения (***ECP***) не распространено, поэтому вся нагрузка ложится на пневматические тормоза, управление которыми в данном режиме может оказаться нарушенным.

Рассмотрим негативные эффекты реализации данного сценария нарушения взаимодействия поездов в интеллектуальной системе распределенной тяги:

– выдавливание вагонов из-за пробоя поглощающих аппаратов при асимметрии торможения на спусках;

– разрыв автосцепки на подъеме или переломе профиля вследствие потери управления задним локомотивом и задержки в срабатывании пневматических тормозов.

Для защиты соединения от данного сценария атаки предлагаются следующие варианты защиты.

1. Применение технологий фазированных антенных решеток (**ФАР**) для изменения диаграммы направленности антенны и повышения уровня сигнала на приемнике при совмещении с геоинформационными системами может обеспечить защищенность радиоканала от помех на физическом уровне.

2. Повышение уровня мощности сигнала снизит влияние маломощных *SDR*-передатчиков. Такой подход применяется в системе [9].

3. Применение *DSSS* (*Direct Sequence Spread Spectrum*), при котором полезный сигнал передается в широкой полосе частот на уровне ниже уровня естественного шума, как это реализовано в *LoRaWAN* или стандарте *IEEE* 802.15.4.

4. Применение систем со множественными приемопередатчиками (***MIMO***). Даже если один пространственный поток заглушен, остальные продолжат передавать данные. Такой подход реализуется в рамках развития протокола сетей связи пятого поколения для железнодорожного транспорта (***FRMCS***), который также поддерживает применение ФАР [10].

Заключение

Кибератаки могут привести к серьезным сбоям в работе системы, включая отказы оборудования различных категорий. Это, в свою очередь, не только увеличивает риски для безопасности движения, но и существенно снижает пропускную способность железнодорожного участка. На практике это может означать увеличение времени ожидания поездов на станциях, сбои в графике движения и, как следствие, потенциальные экономические потери.

Интеграция механизмов защиты различного уровня и превентивная оценка угроз позволяют обеспечить безопасную эксплуатацию подвижного состава с системами распределенной тяги даже в случае реализации сценариев деструктивного воздействия на каналы передачи данных.

Список литературы

1. Семенов, А.П. Система мониторинга локомотивного парка в компании «General Electric Transportation» / А.П. Семенов, И.И. Лакин // Локомотив. – 2021. – № 7(775). – С. 35–37.

2. Шаманов, В.И. Влияние отказов в системах интервального регулирования на движение поездов по двухпутным участкам / В.И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 395–413.

3. Каштанов, А.Л. Оценка эффективности использования УСАВП в грузовом движении / А.Л. Каштанов, А.Н. Ларин, А.В. Пономарев // Известия Транссиба. – 2010. – № 4(4). – С. 49–54.

4. Soderi, S. Railway Cyber-Security in the Era of Interconnected Systems: A Survey / S. Soderi, D. Masti, Yu. Z. Lun // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2023. – Vol. 24. – No. 7. – P. 6764–6779.

5. Барыбина, А.З. Моделирование угроз информационной безопасности сценарным подходом / А.З. Барыбина // Естественно-гуманитарные исследования. – 2022. – № 4(42). – С. 35–44.

6. Елизаров, Д.А. Спутниковые системы позиционирования на железнодорожном транспорте: риски и угрозы / Д.А. Елизаров, М.М. Соколов, А.И. Давыдов // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 12. – С. 25–27.

7. Li, W. Analysis of the Different Locomotive Wireless Multi-Traction Synchronous Control Systems for Heavy-Haul Combined Trains and Their Performance / W. Li // Transportation Safety and

Environment. – 2020. – Vol. 2. – No. 3. – P. 202–215.

8. Попов, П.А. Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта / П.А. Попов [и др.] // Надежность. – 2024. – Т. 24. – № 4. – С. 48–57.

9. Евдокимова, О.Г. Применение технологии интернета вещей для передачи данных от автоматического измерителя сопротивления заземления / О.Г. Евдокимова, С.М. Куценко, Б.А. Мешков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20. – № 3. – С. 758–767.

10. Adriansyah, N.M. Simple Doppler Spread Compensator for Future Railway Mobile Communication Systems (FRMCS) / N.M. Adriansyah // International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2022. – Vol. 12. – P. 1–7.

References

1. Semenov, A.P. Sistema monitoringa lokomotivnogo parka v kompanii «General Electric Transportation» / A.P. Semenov, I.I. Lakin // Lokomotiv. – 2021. – № 7(775). – S. 35–37.

2. Shamanov, V.I. Vliyaniye otkazov v sistemakh interval'nogo regulirovaniya na dvizheniye poyezdov po dvukhputnym uchastkam / V.I. Shamanov // Avtomatika na transporte. – 2021. – T. 7. – № 3. – S. 395–413.

3. Kashtanov, A.L. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya USAVP v gruzovom dvizhenii / A.L. Kashtanov, A.N. Larin, A.V. Ponomarev // Izvestiya Transsiba. – 2010. – № 4(4). – S. 49–54.

5. Barybina, A.Z. Modelirovaniye ugroz informatsionnoy bezopasnosti stsenarnym podkhodom / A.Z. Barybina // Yestestvenno-gumanitarnyye issledovaniya. – 2022. – № 4(42). – S. 35–44.

6. Yelizarov, D.A. Sputnikovyye sistemy pozitsionirovaniya na zheleznodorozhnom transporte: riski i ugrozy / D.A. Yelizarov, M.M. Sokolov, A.I. Davydov // Avtomatika, svyaz', informatika. – 2025. – № 12. – S. 25–27.

8. Popov, P.A. Kompleksnaya bezopasnost' ASU TP ob"yektov KII zheleznodorozhnogo transporta / P.A. Popov [i dr.] // Nadezhnost'. – 2024. – T. 24. – № 4. – S. 48–57.

9. Yevdokimova, O.G. Primeneniye tekhnologii interneta veshchey dlya peredachi dannykh ot avtomaticheskogo izmeritelya soprotivleniya zazemleniya / O.G. Yevdokimova, S.M. Kutsenko, B.A. Meshkov // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya. – 2023. – T. 20. – № 3. – S. 758–767.

© М.А. Сидорович, С.А. Приходько, М.А. Попов, Ю.В. Пономарчук, 2026

УДК 004.056.5

С.С. ШИПУЛИН, С.В. БЕЗЗАТЕЕВ
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФЕДЕРАТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ И БЛОКЧЕЙН-ВАЛИДАЦИИ

Ключевые слова: безопасность; блокчейн; обнаружение вторжений; устойчивость к отравлению; *federated learning; smart contract.*

Аннотация. В статье предлагается архитектура децентрализованной системы обнаружения вторжений, объединяющей федеративное обучение (*federated learning* – ***FL***) и блокчейн-механизм валидации обновлений моделей. Кроме того, предлагается комбинированный подход к устойчивой агрегации.

Описаны угрозы модели: отравление (*model poisoning*), *Sybil*-атаки и подделка обновлений, методы их смягчения и прототипная оценка на публичных наборах данных.

Обсуждаются вопросы масштабируемости, приватности и возможные направления дальнейшей работы.

Цель исследования – разработать и оценить архитектуру децентрализованной системы обнаружения вторжений, объединяющую федеративное обучение и блокчейн-валидацию, для повышения устойчивости к моделированию атак и обеспечения приватности данных.

Задачи исследования: проанализировать существующие подходы к федеративному обучению и блокчейн-технологиям в области сетевой безопасности; разработать архитектуру системы, включающую компоненты клиентов, блокчейн-реестр, смарт-контракты и механизм робастной агрегации; предложить методы защиты от угроз, таких как отравление модели, *Sybil*-атаки и подделка обновлений; реализовать прототип системы и провести оценку ее эффективности на публичных наборах данных (*NSL-KDD* и *UNSW-NB*15); оценить влияние интеграции блокчейн-валидации и робастной агрегации на устойчивость системы и вычислительные ресурсы.

Гипотеза исследования: интеграция блокчейн-валидации с робастной агрегацией и системой репутации узлов значительно снижает эффективность атак типа *poisoning* и *Sybil*, при этом сохраняет приемлемый уровень вычислительных и коммуникационных затрат по сравнению с классическими подходами.

Методы исследования включают в себя: теоретический анализ – изучение существующих методов федеративного обучения, блокчейн-технологий и методов защиты от атак; разработку архитектуры – создание модели системы с использованием блокчейн-реестра, смарт-контрактов и механизмов репутации; криптографические методы – применение цифровых подписей, хеш-операций и криптографических доказательств; робастную агрегацию – использование алгоритмов *Krum* и *Bulyan* для отсеивания вредоносных обновлений; эмпирическую оценку – симуляцию работы системы на публичных наборах данных с моделированием атак (отравление, *Sybil*); анализ эффективности – сравнение метрик точности, *F*1, *TPR*, *FPR* и накладных расходов (время, объем данных).

Введение

Рост числа распределенных сетей и *IoT*-устройств увеличивает поверхность атак и требует распределенных механизмов обнаружения вторжений (***IDS***). Традиционные централизованные *IDS* имеют ограничения по приватности и масштабируемости: передача логов и трафика на центральный сервер нежелательна или невозможна в условиях регуляторных ограничений и высокой пропускной способности. *Federated learning* (***FL***) позволяет узлам обучать глобаль-

ную модель, передавая только обновления параметров, а не исходные данные [1], что повышает приватность. Однако *FL* сам по себе уязвим к целенаправленным атакам: отравлению модели, подделке обновлений, *Sybil*-атакам и др. [2; 3].

Блокчейн предлагает неизменяемый распределенный реестр и смарт-контракты, которые можно использовать для фиксации версий модели, верификации подписи и обеспечения прозрачности операций. Сочетание *FL* и блокчейна может усилить доверие к обновлениям и затруднить внесение поддельных или злонамеренных вкладов [4; 5].

Архитектура системы

Компоненты следующие.

1. Клиенты (*edge*/*hosts*): локальные детекторы, собирающие признаки трафика и логов и обучающие локальные модели. Каждый клиент подписывает свою модель приватным ключом.

2. Публичный блокчейн-реестр: хранит хеши обновлений, подписи, метаданные (*ID* клиента, эпоха, метрики) и результаты валидации. Для практичности предлагается *permissioned*-блокчейн (например, *Hyperledger Fabric*) [11], чтобы контролировать участников и снизить издержки.

3. Смарт-контракты: реализуют процедуру валидации обновлений (проверка подписи, соответствие формату, базовые метрики качества – *loss* на валидационном наборе агрегатора или через криптографические доказательства) и управляют репутацией клиентов.

4. Агрегатор: децентрализованный или полудецентрализованный компонент, собирающий обновления, запрашивающий результаты валидации из блокчейна и выполняющий робастную агрегацию (*Krum*/*Bulyan*) [12; 13]. Итоговый хеш глобальной модели записывается в блокчейн.

Протокол одного раунда.

1. Клиенты обучают модели локально и формируют обновление Δ_i, вычисляют хеш $H(\Delta_i)$ и подписывают его.

2. Клиент отправляет подписанное обновление в сеть и публикует хеш и подпись в блокчейне через смарт-контракт.

3. Смарт-контракт выполняет проверки: корректность подписи, наличие метрик качества (например, *loss* на небольшом публичном валидационном наборе или читаемое *summary*). Результат – *mark_ok*/*mark_bad*.

4. Агрегатор читает блокчейн, отбирает помеченные обновления и применяет робастный агрегатор; финальный хеш глобальной модели записывается в блокчейн.

Репутационная система и *stake*.

1. Каждому клиенту присваивается рейтинг, который повышается/понижается в зависимости от исторической валидации вкладов.

2. Желательно использовать *stake*/депозит для предотвращения *Sybil*-атак – клиенты с низким *stake* не могут влиять существенно на агрегацию.

3. Защита приватности: *Secure aggregation* [9] и *differential privacy* могут быть интегрированы, чтобы скрыть индивидуальные обновления при одновременной возможности верификации их целостности через хеши/подписи.

Прототипная реализация и методика оценки

Для демонстрации предложенного подхода реализован прототип в среде симуляции (псевдораспределенные клиенты). Использовались публичные наборы данных для *IDS*: *NSL-KDD* [14] и *UNSW-NB*15 [15].

Настройка:

– количество клиентов: 20 (симуляция распределения по разным доменам);

– модель: небольшая нейросеть (*dense*/1*D-CNN*) для классификации трафика;

– протокол обучения: *FedAvg* (*baseline*) и *FedAvg* + *blockchain*-валидация + *Krum*/*Bulyan*;

– атаки: *model poisoning* на 10 % и 30 % клиентов (злоумышленники подменяют обновления для снижения эффективности обнаружения определенного класса атак);

– метрики: *accuracy*, *F*1 для класса атаки, *detection rate* (***TPR***), *false positive rate* (***FPR***), а также время одного раунда и объем записей в блокчейне.

Обобщенные результаты

Устойчивость к отравлению: при 10 % злонамеренных клиентов *FedAvg* без защит снижал *F*1 на атакуемом классе примерно на 20–30 % (в зависимости от датасета). Добавление блокчейн-валидации и *Krum* уменьшало падение до 5–10 %; при 30 % злонамеренных вкладов снижение было более значительным, но комбинированная схема по-прежнему давала заметное преимущество по сравнению с чистым *FedAvg*.

Накладные расходы: запись в блокчейн

ограничивалась хешами и метаданными, что обеспечивало относительно невысокую нагрузку на сеть. В прототипе увеличение времени одного раунда составило порядка 10–30 % (в зависимости от параметров сети и конфигурации блокчейна). Объем данных в реестре остается малым при хранении только хешей и минимального набора метрик.

Репутация и стейкинг эффективно снижали влияние *Sybil*-сценариев: атакующие без депозита не могли доминировать.

Обсуждение

Плюсы предложенного подхода: повышенная прозрачность и отслеживаемость вкладов через блокчейн; комбинация криптографической верификации и робастной агрегации снижает успешность отравления; возможность внедрения экономических стимулов (вознаграждение честным участникам).

Ограничения и риски: масштабируемость – публичный блокчейн с высокой нагрузкой может стать узким местом, поэтому предпочтительнее *permissioned*-решение или гибридные подходы; приватность – запись хешей безопасна, но возможны косвенные утечки через контроль метрик; интеграция *secure aggregation* и *DP* обязательна для высоких требований к приватности; стоимость и задержки – в реальных сетях латентность подтверждения транзакций и стоимость газа (в публичных блокчейнах) могут быть критичны; злоумышленники могут организовать сложные адаптивные атаки, комбинируя отравление с манипуляцией репутацией, что требует дальнейшего моделирования.

Вывод

Предложена практичная архитектура децентрализованной системы обнаружения вторжений, объединяющая преимущества *federated learning* и блокчейн-валидации. Комбинация верификации обновлений в блокчейне, робастной агрегации и репутационной системы демонстрирует устойчивость к основным типам атак на модель в прототипной оценке.

Список литературы / References

1. McMahan, B. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data / B. McMahan, E. Moore, D. Ramage, S. Hampson, B. Agüera y Arcas // Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS). – 2017. – Vol. 54. – P. 1273–1282.

2. Bhagoji, A.N. Analyzing Federated Learning through an Adversarial Lens / A.N. Bhagoji, S. Chakraborty, P. Mittal, S. Calo // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2019. – P. 634–643.

3. Bagdasaryan, E. How To Backdoor Federated Learning / E. Bagdasaryan, A. Veit, Y. Hua, D. Estrin, V. Shmatikov // Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS). – 2020. – Vol. 108. – P. 2938–2948.

4. Christidis, K. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things / K. Christidis, M. Devetsikiotis // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2292–2303.

5. Kim, M. Towards Secure Federated Learning: Blockchain and Smart Contract / M. Kim, H. Kim [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 1654–1664.

6. Bonawitz, K. Practical Secure Aggregation for Federated Learning on User-Held Data / K. Bonawitz, V. Ivanov, B. Kreuter [et al.] // Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS). – 2017. – P. 1175–1191.

7. Steinhardt, J. Certified Defenses for Data Poisoning Attacks / J. Steinhardt, P.W. Koh, P. Liang // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2017. – Vol. 30. – P. 3517–3529.

8. Gilad-Bachrach, R. Cryptonets: Applying Neural Networks to Encrypted Data with High Throughput and Accuracy / R. Gilad-Bachrach, N. Dowlin, K. Laine [et al.] // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning (ICML). – 2016. – P. 201–210.

9. Zyskind, K. Decentralizing Privacy: Using Blockchain to Protect Personal Data / K. Zyskind, O. Nathan // Proceedings of the 2015 IEEE Security and Privacy Workshops. – 2015. – P. 180–184.

10. Androulaki, E. Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains / E. Androulaki, A. Barger, V. Bortnikov [et al.] // Proceedings of the Thirteenth EuroSys

Conference. – 2018. – P. 1–15.

11. Blanchard, P. Machine Learning with Adversaries: Byzantine Tolerant Gradient Descent / P. Blanchard, E.M. El Mhamdi, R. Guerraoui, J. Stainer // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2017. – Vol. 30. – P. 119–129.

12. Mhamdi, E.M. The Hidden Vulnerability of Distributed Learning in Byzantium / E.M. Mhamdi, R. Guerraoui, S. Rouault // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2018. – P. 3521–3530.

13. Tavallaee, M. A Detailed Analysis of the KDD CUP 99 Data Set / M. Tavallaee, E. Bagheri, W. Lu, A. Ghorbani // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA). – 2009. – P. 1–6.

14. Moustafa, N. UNSW-NB15: A Comprehensive Data Set for Network Intrusion Detection Systems (UNSW-NB15 Dataset) / N. Moustafa, J. Slay // Proceedings of the 2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS). – 2015. – P. 1–6.

© С.С. Шипулин, С.В. Беззатеев, 2026

УДК 004.93: 69.058

Е.С. ГЛУМОВА, А.Д. ФИЛИНСКИХ
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

ОЦЕНКА СЕМАНТИЧЕСКОЙ СОГЛАСОВАННОСТИ ИЕРАРХИЧЕСКОГО РАЗБИЕНИЯ ОБЛАКА ТОЧЕК

Ключевые слова: иерархическое разбиение; облако точек; предобработка данных; семантическая согласованность; *F*1-мера; *Boundary Precision; Boundary Recall; BVH.*

Аннотация. Целью статьи является разработка и экспериментальная апробация методики оценки семантической согласованности иерархического разбиения облака точек, получаемого с помощью адаптивного *BVH*-разбиения. Задача состоит в количественном сопоставлении границ листовых блоков разбиения с эталонной семантической разметкой и анализе внутренней однородности блоков при разных уровнях гранулярности. Гипотеза заключается в том, что модифицированный *SAH*-критерий, учитывающий локальные неоднородности плотности и высоты, позволяет получать разбиение, границы которого лучше согласованы с семантическими переходами сцены, чем стандартные схемы пространственного деления. Методика основана на вычислении метрик полноты *Boundary Recall*, точности *Boundary Precision* границ и *F*1-меры при варьируемом пространственном допуске, а также показателя чистоты блоков *purity* и морфологических признаков (линейность, планарность, сферичность). Эксперименты выполнены на фрагменте *Paris_section* набора *NPM3D/Paris-Lille-3D* с укрупненной до четырех классов семантической разметкой. Результаты показали, что *BVH*-разбиение обеспечивает значения *F*1-меры 0,625–0,627 при допуске 0,6 м для уровней гранулярности 12, 40 и 100 блоков, превышая аналогичные показатели *KD-tree*, *Octree* и *Voxel grid*. Медианная чистота блоков возрастает с 0,787 до 0,991 при увеличении числа блоков, подтверждая снижение смешения семантических классов.

Список обозначений и сокращений:

– *BVH* – иерархия ограничивающих объемов;

– *KD-tree* – *k*-мерное дерево пространственного разбиения;

– *Octree* – октодерево, иерархическая структура восьмеричного пространственного разбиения;

– *BR* – полнота границ *Boundary Recall*;

– *F*1 – *F*1-мера, гармоническое среднее *BR* и *BP*;

– *G* – целевой уровень гранулярности разбиения;

– *SAH* – эвристика площади поверхности;

– *Voxel grid* – регулярная воксельная сетка;

– *k* – число ближайших соседей при определении граничных точек;

– *BP* – точность границ *Boundary Precision*;

– δ – пространственный допуск при сопоставлении границ, м;

– *purity* – чистота блока.

Введение

Технологии лазерного сканирования являются одним из основных источников пространственных данных о геометрии существующих промышленных, гражданских и инфраструктурных объектов. Результатом сканирования является неструктурированное облако точек, которое может рассматриваться как дискретное пространственное представление геометрии объекта. Рост плотности и объема таких данных обусловливает необходимость разработки методов предварительной структуризации перед последующей обработкой, визуализацией, анализом и использованием в технологиях информационного моделирования в строительстве,

геоинформационных системах и средах геометрического моделирования [1].

Одним из способов такой структуризации является иерархическое пространственное разбиение. Оно позволяет перейти от неупорядоченного множества точек к системе листовых блоков, пригодных для локальной обработки. Но само по себе пространственное разбиение не обеспечивает совпадения границ блоков с объектными переходами сцены [2]. В инженерных задачах важно, чтобы блок не только содержал ограниченное число точек, но и по возможности не объединял разнородные зоны: поверхность земли, фасады зданий, растительность и малые объекты городской среды [3].

В отличие от нейросетевых методов семантической сегментации [4], ориентированных на присвоение метки каждой точке, в данной работе рассматривается предварительное пространственное разбиение без обучения. Существующие обзоры [5] показывают, что геометрические и супервоксельные методы остаются востребованными для решения задач предобработки и упрощения данных.

С методической точки зрения близки подходы супервоксельного разбиения облаков точек, в которых исходное множество точек представляется набором локально однородных фрагментов [6].

В настоящей работе используется аналогичная логика оценки. Качество предварительного разбиения анализируется не по точности присвоения классов, а по сохранению границ между эталонными семантическими областями и по степени смешения классов внутри полученных блоков [2].

Целью настоящей статьи является разработка и экспериментальная апробация методики оценки семантической согласованности иерархического разбиения облака точек на основе сопоставления границ листовых блоков с эталонной семантической разметкой и анализа внутренней однородности полученных блоков.

BVH-разбиение

Иерархия ограничивающих объемов (***BVH***) широко используется для ускорения трассировки лучей и пространственных запросов. Сравнительные исследования на современных процессорах показывают, что *BVH* может обеспечивать более высокую производительность по сравнению с *KD-tree* [7]. Но такие работы направлены исключительно на вычислительную эффективность и не учитывают морфологическую неоднородность облаков точек, существенную для задач семантически ориентированного разбиения.

В качестве основного способа предварительной структуризации используется адаптивное *BVH*-разбиение облака точек [8; 9]. *BVH*-разбиение рассматривается как бинарная иерархия ограничивающих объемов, в которой каждому узлу соответствует подмножество точек, заключенное в прямоугольный ограничивающий параллелепипед, ориентированный по координатным осям. Стоимость разбиения узла в исходной постановке вычисляется по эвристике площади поверхности *Surface Area Heuristic*, применяемой при построении иерархий ограничивающих объемов [10].

В предложенной конфигурации *BVH*-разбиения исходный *SAH*-критерий C_{SAH} корректируется с учетом морфологических признаков распределения точек:

$$C'_{split} = C_{SAH}\left(1 - \lambda_D \Delta_{dens} - \lambda_H \Delta_{height}\right), \qquad (1)$$

где C_{SAH} – стоимость разбиения узла, вычисленная по эвристике площади поверхности; Δ_{dens} и Δ_{height} – нормированные метрики контраста локальной плотности и распределения точек вдоль оси между дочерними узлами; λ_D и λ_H – весовые коэффициенты соответствующих морфологических составляющих.

Для сохранения неотрицательности стоимости выполняется ограничение $\lambda_D + \lambda_H \leq 1$ при $0 \leq \lambda_D \leq 1$, $0 \leq \lambda_H \leq 1$. Гранулярность разбиения дополнительно регулируется порогами N_{min}, N_{max}, ограничивающими минимальный и максимальный размер листовых блоков.

Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование включало две серии. Первая была направлена на анализ чувствительности метрик согласованности границ к пространственному допуску δ для одного результата *BVH*-разбиения. В этой серии значения полноты границ *BR*, точности границ *BP* и *F*1-меры рассчитывались при $\delta \in \{0{,}2;\ 0{,}4;\ 0{,}6;\ 1{,}0\}$ м.

Вторая серия экспериментов была направлена на сравнение предложенного *BVH*-разбиения с базовыми методами простран-



Рис. 1. Облако точек *Paris* с классификацией точек

ственного разбиения *KD-tree*, *Octree* и *Voxel grid*. Сравнение проводилось при сопоставимом числе листьев (G = 12, G = 40, G = 100) и при фиксированном значении δ = 0,6 м.

Оба эксперимента включали несколько этапов:

– подготовка исходного облака точек с эталонной семантической разметкой;

– формирование блоков пространственного разбиения;

– построение и сопоставление границ листовых блоков;

– расчет метрик согласованности границ и внутренней однородности блоков.

В качестве тестового набора данных был выбран фрагмент *Paris_section* [11] из академического бенчмарка *NPM3D*, содержащий 8,5 млн точек и включающий такие семантические классы, как «земля», «здания», «растительность» и др. (рис. 1), каждому из которых присвоен свой цвет.

Для оценки крупномасштабной согласованности структура семантических классов была укрупнена до четырех групп: *ground*, *building*, *natural-vegetation* и *other* (табл. 1). Такое укрупнение соответствует масштабу рассматриваемой задачи, поскольку анализ направлен на оценку согласованности с крупными объектными зонами городской сцены, а не на различение всех малых классов исходного набора.

В качестве базовых схем пространственного разбиения использовались *KD-tree* [13], *Octree* [13] и *Voxel grid* [13]. *KD-tree* и *BVH* относятся к иерархическим структурам пространственной организации данных; *Octree* широко применяется при сегментации облаков точек, а воксельные структуры используются в задачах супероксельного разбиения и локальной группировки точек.

Сопоставимость обеспечивалась по целевому уровню гранулярности G, принимавшему значения 12, 40 и 100. Фактическое число непустых листовых блоков могло отличаться от заданного целевого уровня G, поскольку сравниваемые методы имеют различные механизмы управления гранулярностью.

Для каждого метода параметры подбирались так, чтобы получить фактическое число непустых блоков, близкое к целевым уровням G = 12, G = 40, G = 100. Для *BVH* гранулярность регулировалась порогами минимального и максимального числа точек в листовом узле. *KD-tree*-разбиение выполнялось рекурсивным делением множества точек по координатной оси с максимальной дисперсией; после сортировки по выбранной координате блок делился по медиане. *Octree*-разбиение выполнялось путем рекурсивного деления ограничивающего куба сцены на восемь подъячеек до заданной глубины. *Voxel grid*-разбиение выполнялось путем дискретизации пространства регулярной воксельной сеткой; точки одного занятого вокселя объединялись в один блок.

Для количественной оценки согласованности разбиения с эталонной семантической разметкой использовались полнота границ *Boundary Recall* (***BR***), точность границ *Boundary Precision* (***BP***) и $F1$-мера. Граничные точки определялись по локальной окрестности. Точка считалась граничной, если среди ее k-ближайших соседей имелась хотя бы одна точка с другой меткой. Для эталонной границы использовались укрупненные семантические классы, для границы результата – идентифика-

Таблица 1. Укрупнение семантических классов

Исходный класс	Целевой класс
0 *unclassified*	3 – *other*
1 *ground*	0 – *ground*
2 *building*	1 – *building*
3 *pole – road sign – traffic light*	3 – *other*
4 *bollard – small pole*	3 – *other*
5 *trash can*	3 – *other*
6 *barrier*	3 – *other*
7 *pedestrian*	3 – *other*
8 *car*	3 – *other*
9 *natural – vegetation*	2 – *natural – vegetation*

торы листовых блоков. Во всех экспериментах принималось $k = 12$.

Сопоставление границ выполнялось с пространственным допуском δ. Эталонная граничная точка считалась покрытой результатом разбиения, если в радиусе δ от нее находилась хотя бы одна граничная точка результата. Аналогично граничная точка результата считалась согласованной с эталоном, если в радиусе δ находилась хотя бы одна эталонная граничная точка.

Полнота (*Recall*) определяется как:

$$BR(\delta) = \frac{N_R(\delta)}{N_{GT}}, \quad (2)$$

где $N_R(\delta)$ – число эталонных граничных точек, покрытых границей разбиения в пределах допуска δ; N_{alg} – общее число эталонных граничных точек.

Точность границ (*Precision*) определяется как:

$$BP(\delta) = \frac{N_P(\delta)}{N_{alg}}, \quad (3)$$

где $N_p(\delta)$ – число граничных точек результата, согласованных с эталонной границей в пределах допуска δ; N_{alg} – общее число граничных точек результата разбиения.

В качестве интегральной метрики, объединяющей точность и полноту, используется $F1$-мера, представляющая собой их гармоническое среднее:

$$F1(\delta) = 2 \cdot \frac{BP(\delta) \cdot BR(\delta)}{BP(\delta) + BR(\delta)}. \quad (4)$$

В эксперименте использовались значения $\delta \in \{0{,}2;\ 0{,}4;\ 0{,}6;\ 1{,}0\}$ м. Набор значений δ использовался для анализа чувствительности метрик к допустимому пространственному смещению границ.

Внутренняя семантическая однородность блоков оценивалась через показатель чистоты блока *purity*, равный доле точек доминирующего эталонного класса в блоке:

$$\text{purity}(B) = \max_c \frac{|\{p \in B : GT(p) = c\}|}{|B|}, \quad (5)$$

где B – листовой блок; $|B|$ – число точек в блоке; p – точка блока; $GT(p)$ – эталонный класс точки; c – класс из множества укрупненных семантических классов.

Для дополнительной характеристики внутренней геометрической структуры блоков вычислялись признаки [14; 15], основанные на собственных значениях ковариационной матрицы координат точек. Для множества $\{x_i\}_{i=1}^n \subset R3$ со средним $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i$ рассматривалась матрица:

$$C = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^{\top} \quad (6)$$

с собственными значениями $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$. На их основе вводились стандартные морфологи-

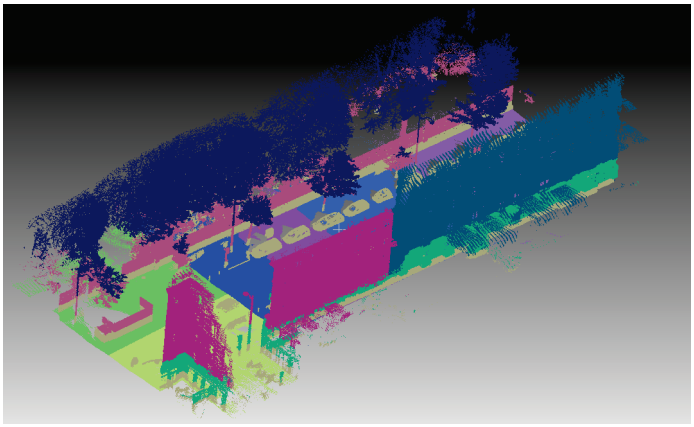


Рис. 2. Результат *BVH*-разбиения облака точек

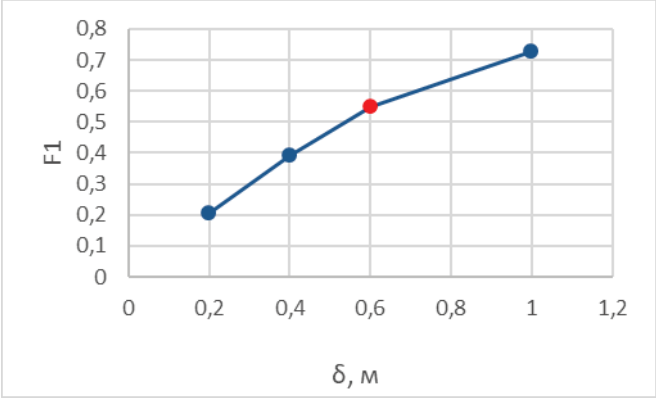


Рис. 3. Зависимость *F*1-меры от пространственного допуска δ для *BVH*

ческие индикаторы линейности, планарности, сферичности и анизотропии:

$$L = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1},$$
$$P = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1},$$
$$S = \frac{\lambda_3}{\lambda_1},$$
$$A = \frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_1} = 1 - S, \quad (7)$$

где L – линейность; P – планарность; S – сферичность; A – анизотропия.

На рис. 2 представлен результат *BVH*-разбиения на 12 листовых блоков. Облако точек окрашено по принадлежности к итоговым блокам.

Результаты экспериментов

В первой серии экспериментов была оценена зависимость *F*1-меры от величины пространственного допуска δ для *BVH*-разбиения. Значение *F*1-меры возрастает при увеличении δ, что указывает на повышение согласованности границ блоков с эталонными семантическими переходами. На рис. 3 представлена зависимость *F*1-меры от пространственного допуска. Монотонный рост показателя подтверждает чувствительность оценки к выбранному пространственному допуску.

Далее были отдельно проанализированы полнота границ *BR* и точность границ *BP*. Полученные зависимости показывают, что обе метрики возрастают при увеличении δ, при этом полнота границ систематически превышает точность. При δ = 0,6 м значение *BR* составляет 0,653, а *BP* – 0,475; при δ = 1,0 м значения возрастают до 0,862 и 0,629 соответственно (рис. 4). Это означает, что границы *BVH*-блоков в большей степени покрывают эталонные семантические переходы, чем точно совпадают с

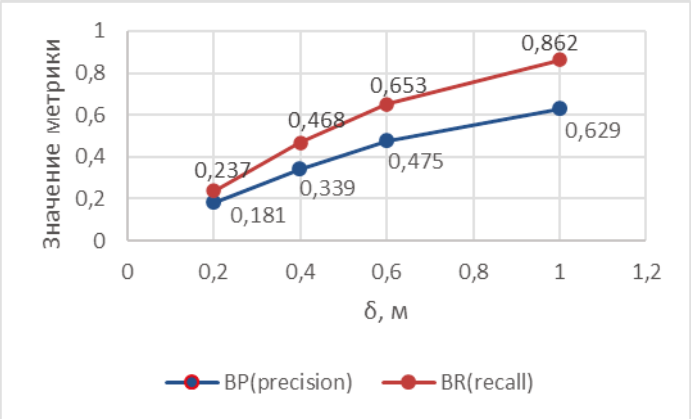


Рис. 4. Зависимость полноты (*BR*) и точности (*BP*) от допуска δ для *BVH*

Таблица 2. *F*1-мера при δ = 0,6 м для различных методов разбиения

Метод	*G* = 12 блоков	*G* = 40 блоков	*G* = 100 блоков
BVH	0,625	0,627	0,627
KD-tree	0,239	0,343	0,511
Octree	0,089	0,230	0,229
Voxel grid	0,120	0,187	0,293

ними по координатам.

Первая серия экспериментов показала, что оценка согласованности границ зависит от масштаба пространственного допуска. Поэтому для сравнения методов разбиения во второй серии экспериментов было выбрано фиксированное значение δ = 0,6 м как промежуточное в рассмотренном диапазоне.

Сравнение с альтернативными схемами пространственного разбиения выполнялось при целевых уровнях гранулярности $G = 12$, $G = 40$, $G = 100$. Табл. 2 отражает значения *F*1-меры при рабочем допуске δ = 0,6 м, а рис. 5 показывает изменение *F*1-меры при варьировании δ для тех же уровней гранулярности.

При δ = 0,6 м метод *BVH* демонстрирует наиболее высокие значения *F*1-меры среди рассмотренных методов: 0,625; 0,627 и 0,627 при $G = 12$, $G = 40$, $G = 100$ соответственно. *KD-tree* показывает рост *F*1-меры при увеличении гранулярности: от 0,239 при $G = 12$ до 0,511 при $G = 100$, но остается ниже *BVH*. *Octree* и *Voxel grid* демонстрируют более низкие значения *F*1-меры, что связано с фиксированной пространственной структурой разбиения и меньшей адаптацией к объектным переходам сцены.

Анализ чистоты блока *purity* показывает, что увеличение гранулярности повышает внутреннюю семантическую однородность *BVH*-блоков. Медианная чистота возрастает с 0,787 при фактическом числе 12 блоков до 0,947 при 43 блоках и 0,991 при 114 блоках. Доля точек, попадающих в блоки с чистотой не ниже 0,9, также возрастает с 0,212 до 0,653. Следовательно, увеличение гранулярности разбиения способствует повышению внутриблочной семантической однородности, но сопровождается ростом числа листовых блоков и большей фрагментацией исходной сцены.

Обсуждение результатов исследования

Полученные значения полноты границ *BR* и точности границ *BP* показывают, что предложенное *BVH*-разбиение характеризуется преобладанием полноты над точностью. Это означает, что значительная часть эталонных семантических переходов покрывается грани-

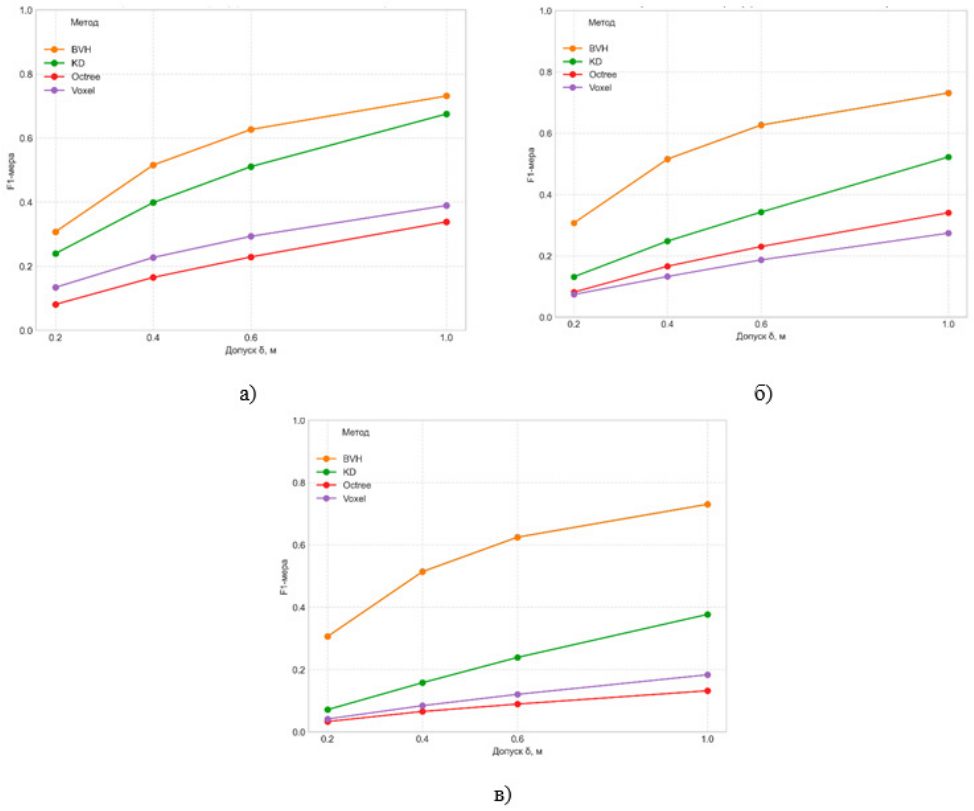


Рис. 5. Зависимость *F*1-меры от допуска δ для методов пространственного разбиения при целевых уровнях гранулярности: а) *G* = 100; б) *G* = 40; в) *G* = 12

цами листовых блоков, но часть сформированных границ не соответствует переходам между укрупненными семантическими классами. С точки зрения терминологии сегментации такой результат соответствует режиму избыточной сегментации, при котором один семантический объект или одна объектная зона могут быть представлены несколькими пространственными фрагментами.

Для этапа предварительной структуризации такой характер разбиения допустим. Разделение однородной области на несколько блоков создает меньше препятствий для последующей локальной обработки, чем недосегментация, при которой в одном листовом узле объединяются точки, относящиеся к разным объектам.

Сравнение с *KD-tree*, *Octree* и *Voxel grid* показывает, что эти методы демонстрируют меньшую согласованность границ с объектами сцены. Разбиение методом *KD-tree* улучшает *F*1-меру с ростом числа листовых блоков за счет уменьшения среднего размера блока и более детального деления пространства, но даже при *G* = 100 уступает *BVH*. *Octree* и *Voxel grid* дают более низкие значения *F*1-меры, что объясняется фиксированной геометрией разбиения и слабой чувствительностью к морфологической неоднородности городской сцены.

Показатель чистоты блока дополняет граничные метрики, характеризуя состав точек внутри листового узла. При низкой гранулярности отдельные блоки могут захватывать крупные семантические переходы, сохраняя смешение классов. Рост числа блоков ведет к увеличению медианной чистоты, то есть к снижению внутриблочного смешения укрупненных классов. Следовательно, выбор оптимального уровня гранулярности должен опираться на совместный анализ числа блоков, медианной чистоты и доли точек, принадлежащих блокам с высокой чистотой, а не только на *F*1-меру границ.

Морфологические признаки позволяют охарактеризовать форму получаемых блоков. Низкая сферичность *BVH*-разбиения говорит о формировании блоков с выраженной геометрической структурой. Вместе с тем морфологическая однородность не заменяет семанти-

ческую однородность.

К ограничениям экспериментов следует отнести использование одного фрагмента городской сцены и укрупнение исходной семантической разметки до четырех классов. Такое укрупнение оправдано при анализе масштабных объектных зон, но не позволяет судить о качестве детальной многоклассовой сегментации. Кроме того, сравниваемые методы различаются механизмами управления гранулярностью, что необходимо учитывать при интерпретации сравнительных результатов.

Заключение

В статье предложена и апробирована методика оценки семантической согласованности иерархического разбиения облака точек. Методика основана на совместном использовании метрик согласованности границ, показателя чистоты листовых блоков и морфологических признаков внутренней структуры блоков.

Проведенные эксперименты показали, что *BVH*-разбиение устойчиво работает в режиме избыточной сегментации. При решении задач предварительной структуризации такой режим приемлем, поскольку отнесение одного объектного класса к нескольким листовым блокам менее критично для дальнейшей локальной обработки, чем попадание семантически разнородных точек в общий сегмент.

Увеличение гранулярности разбиения закономерно повышает внутриблочную семантическую однородность. Для предложенного *BVH*-разбиения медианная чистота возрастает с 0,787 при 12 блоках до 0,991 при 114 блоках, а доля точек, находящихся в блоках с чистотой не ниже 0,9, увеличивается с 0,212 до 0,653, что количественно подтверждает снижение степени смешения укрупненных семантических классов по мере детализации.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на апробацию предложенной методики на сценах с иной пространственной структурой, оценку устойчивости метрик по независимым фрагментам и сопоставление с супервоксельными методами разбиения.

Список литературы

1. Rashdi, R. Scanning Technologies to Building Information Modelling: A Review / R. Rashdi, J. Martínez-Sánchez, P. Arias, K. Khoshelham // Infrastructures. – 2022. – Vol. 7. – No. 4. – P. 49.

2. Lin, Y. Toward Better Boundary Preserved Supervoxel Segmentation for 3D Point Clouds / Y. Lin, C. Wang, D. Zhai, W. Li, J. Li // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 143. – P. 39–47.

3. Abreu, N. Procedural Point Cloud Modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM Applications: A Review / N. Abreu, R. Pinto, A. Matos, M. Pires // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2023. – Vol. 12. – No. 7. – P. 260.

4. Hu, Q. RandLA-Net: Efficient Semantic Segmentation of Large-Scale Point Clouds / Q. Hu, B. Yang, L. Xie, S. Rosa, Y. Guo, Z. Wang, N. Trigoni, A. Markham // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Seattle, WA, USA, 2020. – P. 11108–11117.

5. Grilli, E. A Review of Point Clouds Segmentation and Classification Algorithms / E. Grilli, F. Menna, F. Remondino // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. XLII-2/W3. – P. 339–344.

6. Papon, J. Voxel Cloud Connectivity Segmentation: Supervoxels for Point Clouds / J. Papon, A. Abramov, M. Schoeler, F. Worgotter // 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Portland, OR, USA, 2013. – P. 2027–2034.

7. Rivera-Alvarado, E. An Evaluation of Kd-Trees vs Bounding Volume Hierarchy (BVH) Acceleration Structures in Modern CPU Architectures / E. Rivera-Alvarado, J. Zamora-Madrigal // Revista Tecnología en Marcha. – 2023. – Vol. 36. – No. 2. – P. 86–98.

8. Глумова, Е.С. Алгоритм адаптивного разбиения облака точек с использованием иерархии ограничивающих объемов / Е.С. Глумова // ГрафиКон 2025 : материалы 35-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2025. – С. 976–984

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025692376 Российская Федерация. Система иерархического разбиения облака точек / Е.С. Глумова ; заявитель

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». – Заявл. 10.11.2025 ; опубл. 20.11.2025.

10. Wald, I. On Fast Construction of SAH-Based Bounding Volume Hierarchies / I. Wald // 2007 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing (RT'07). – Ulm, Germany, 2007. – P. 33–40.

11. NPM3D Benchmark Suite [Electronic resource]. – Access mode : https://npm3d.fr/paris-lille-3d.

12. Wang, W. A Hybrid Spatial Indexing Structure of Massive Point Cloud Based on Octree and 3D R*-Tree / W. Wang, Y. Zhang, G. Ge, Q. Jiang, Y. Wang, L. Hu // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – No. 20. – P. 9581.

13. Vo, A.-V. Octree-Based Region Growing for Point Cloud Segmentation / A.-V. Vo, L. Truong-Hong, D.F. Laefer, M. Bertolotto // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 104. – P. 88–100.

14. Hackel, T. Contour Detection in Unstructured 3D Point Clouds / T. Hackel, J.D. Wegner, K. Schindler // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Las Vegas, NV, USA, 2016. – P. 1610–1618.

15. Weinmann, M. Semantic Point Cloud Interpretation Based on Optimal Neighborhoods, Relevant Features and Efficient Classifiers / M. Weinmann et al. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 105. – P. 286–304.

References

8. Glumova, Ye.S. Algoritm adaptivnogo razbiyeniya oblaka tochek s ispol'zovaniyem iyerarkhii ogranichivayushchikh ob"yemov / Ye.S. Glumova // GrafiKon 2025 : materialy 35-y Mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i mashinnomu zreniyu. – Yoshkar-Ola : Povolzhskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet, 2025. – S. 976–984

9. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025692376 Rossiyskaya Federatsiya. Sistema iyerarkhicheskogo razbiyeniya oblaka tochek / Ye.S. Glumova ; zayavitel' FGBOU VO «Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. R.Ye. Alekseyeva». – Zayavl. 10.11.2025 ; opubl. 20.11.2025.

© Е.С. Глумова, А.Д. Филинских, 2026

УДК 514.18:539.382

А.В. ОРЕХОВ
ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», пос. Караваево

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ FDM-ЭКСТРУЗИИ В СИСТЕМЕ APM FEM ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ

Ключевые слова: внутренняя топология; геометрическая дискретизация; конечно-элементная сетка; моделирование напряженно-деформированного состояния; параметризация геометрии; *APM FEM; FDM*-технологии.

Аннотация. В работе рассматривается задача цифровой поддержки жизненного цикла изделий, изготавливаемых методом послойного наплавления (***FDM***).

Цель исследования – разработка и экспериментальное подтверждение способа параметризации геометрических факторов *FDM*-экструзии в среде *APM FEM* для повышения точности расчета несущей способности локальных зон и конструктивных элементов деталей при одноосном растяжении без избыточного усложнения общей *CAD*-геометрии.

Задачи исследования следующие.

1. Разработать параметрические алгоритмы связи технологических факторов экструзии (толщины слоя, конфигурации и плотности заполнения) с конечно-элементной моделью *APM FEM*.

2. Провести натурные механические испытания на осевое растяжение для оценки погрешности разработанных цифровых моделей.

В качестве гипотезы исследования выдвинуто предположение о том, что идеализация геометрического сечения наплавляемой нити до прямоугольной формы позволит избежать избыточного дробления КЭ-сетки в зонах сопряжения слоев и обеспечит стабильную генерацию расчетной сетки *APM FEM* без потери точности моделирования.

Методы: в работе использованы методы геометрического моделирования регулярных сетчатых топологий в САПР КОМПАС-3*D*, а также методы натурного эксперимента по осевому растяжению образцов из *PLA*-полимера на универсальной испытательной машине.

Достигнутые результаты: разработанные алгоритмы прямого параметрического моделирования по данным слайсера обеспечивают визуализацию полей перемещений и коэффициентов запаса по прочности. Предложенные решения позволяют имитировать внутреннюю геометрию по *G*-коду в среде *CAE*. Валидация разработанных математических моделей осуществлена на основе ретроспективного анализа массива экспериментальных данных, накопленных на кафедре строительных конструкций в период с 2021 по 2025 гг. Погрешность КЭ-моделирования относительно натурных тестов образцов из *ABS* и *PLA* не превышает 10 % (9,89 % в верификационном тесте), что доказывает стабильность решений.

Введение

Актуальность: широкое внедрение деталей, изготовленных методом послойного наплавления (*FDM*/*FFF*), сдерживается выраженной послойной неравномерностью их микроструктуры, которая напрямую определяется траекторией укладки полимерного прутка, толщиной формируемого слоя и температурными градиентами сплавления нитей [1].

Необходимость точного моделирования внутренней топологии продиктована тем, что традиционные *CAE*-системы воспринимают деталь как монолитную, игнорируя внутреннюю

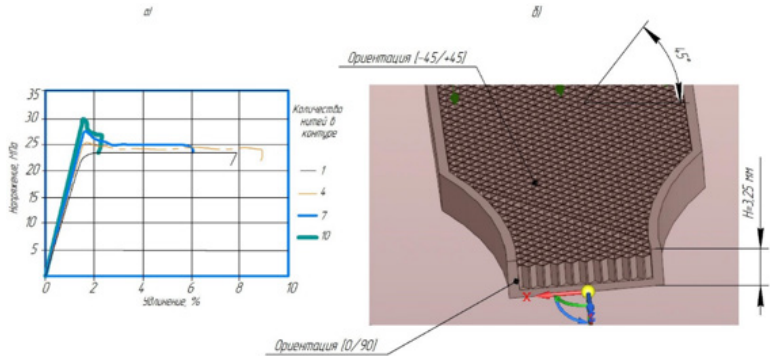


Рис. 1. Диаграмма деформирования полимера при растяжении: напряжение – относительное удлинение (а) и топология внутреннего сетчатого заполнения *FDM*-изделия (б)

топологию укладки пластика, задаваемую программами-слайсерами (рис. 1б). Прямое внедрение точной микроструктуры (пустот, типов заполнения, контурных стенок) непосредственно в *CAD*-модель приводит к усложнению геометрии. Это влечет рост числа конечных элементов при разбиении, перегружает вычислительные мощности электронной вычислительной машины (**ЭВМ**).

Ограничение доступа к зарубежным тяжелым расчетным комплексам (*ANSYS*, *COMSOL Multiphysics* и др.) на отечественном рынке обусловливает необходимость развития методов расчета конечно-элементного анализа в российском программном обеспечении (**ПО**). Однако стандартные инструменты все еще требуют выполнения ручной прорисовки заполнения, что делает невозможным автоматический расчет по *G*-коду. Это обуславливает необходимость анализа существующих подходов, представленных в литературе.

Анализ литературных источников

Изучение того, как параметры *FDM*-экструзии влияют на прочность полимеров, началось еще в конце 1990-х гг. Авторы работ [2–4] установили, что пространственная ориентация нитей и заполнения относительно вектора растягивающей нагрузки определяет до 80 % несущей способности полимерных образцов. Как именно предел прочности зависит от плотности укладки, толщины контуров и режимов печати для *ABS* и *PLA*, детально показано в публикациях [5; 10; 11].

Обычно траектории печати скрыты внутри *G*-кода и недоступны напрямую для инженерного конечно-элементного анализа (***CAE***). Предложенный подход прямого моделирования в среде КОМПАС-3*D* позволяет воссоздать структуру любой пористости. Для проверки метода была взята регулярная сетчатая топология (рис. 1б). Нити в смежных слоях лежат взаимно перпендикулярно и развернуты под углами ±45° к продольной оси образца. Выполненная пористая микроструктура в приложении *APM FEM* была разбита на сетку 10-узловых тетраэдров.

Научная проблема заключается в том, что при детальном моделировании внутренних пор *FDM*-изделий кратно возрастает сложность геометрии. Это приводит к критической перегрузке геометрического ядра системы автоматизированного проектирования (**САПР**) и расчетных модулей *CAE*-систем, делая невозможным расчет крупногабаритных конструкций с высокой плотностью заполнения.

Цель исследования – разработка и экспериментальная верификация метода параметризации геометрических факторов *FDM*-экструзии в среде *APM FEM* для повышения точности расчета прочности деталей без избыточного усложнения общей *CAD*-геометрии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс взаимосвязанных научно-практических задач. Во-первых, требуется разработать параметрические алгоритмы, связывающие ключевые технологические факторы экструзии (толщину слоя, конфигурацию и плотность заполнения) с конечно-элементной моделью *APM FEM*. Во-вторых, необходимо реализовать серию натурных механических испытаний на осевое растяжение, что позволит провести верификацию созданных цифровых моделей и оценить их реальную погрешность.

Таблица 1. Физико-механические параметры материалов нити для конечно-элементного анализа

Физико-механический параметр	*PLA* (паспорт *REC/FDPlast*)	*ABS* (паспорт *REC/FDPlast*)
Модуль Юнга, *E*, МПа	2 300–2 450	1 270–1 710
Коэффициент Пуассона, *v*	0,36	0,38
Предел прочности при растяжении, $\sigma_в$, МПа	55,0–57,8	35,0–45,0
Плотность материала, ρ, г/см^3	1,24	1,05

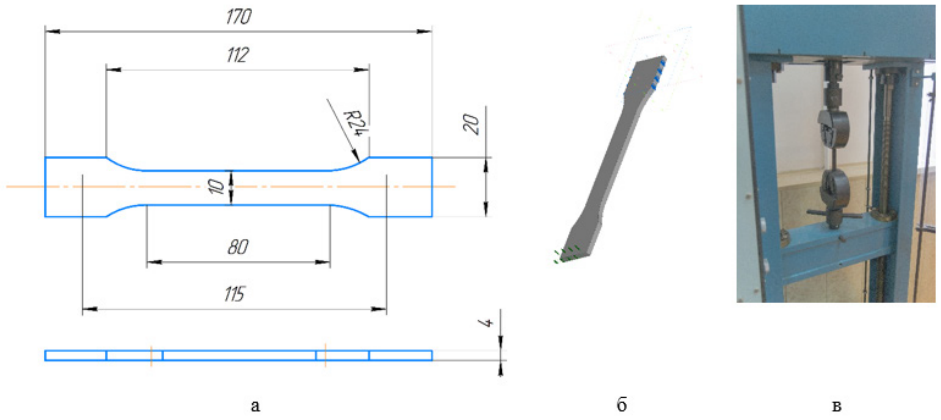


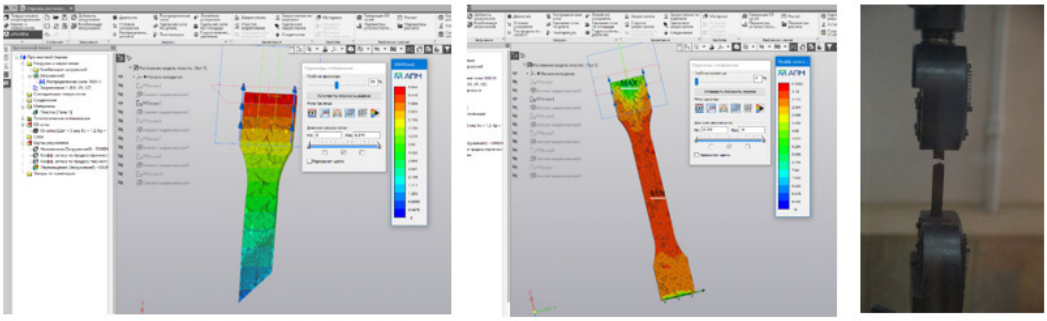
Рис. 2. Компоненты численно-экспериментального исследования при осевом растяжении: а – геометрические параметры плоского образца (ГОСТ 11262-2017); б – задание закрепления и усилий в интерфейсе *APM FEM*; в – фиксация образца в гидравлических захватах испытательной машины

Материалы и методы

1. Объект геометрического моделирования. Для проведения численных и натурных испытаний была выбрана геометрия плоского образца «лопатки» по ГОСТ 11262-2017 с рабочей частью постоянного прямоугольного сечения и начальной длиной l_0 (рис. 2а). Использование стандартного образца позволяет исключить влияние масштабных факторов и сконцентрироваться на параметризации внутренней структуры филамента. Поскольку механические свойства *FDM*-изделий носят выраженный анизотропный характер и зависят от параметров спекания слоев, физико-механические характеристики материала для КЭ-анализа принимались на основе паспортов производителей (*REC*, *FDPlast*) [6–8], табл. 1. Натурные испытания и геометрические параметры плоских образцов типа «лопатка» определялись в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (*ISO* 527-2), а требования к протоколированию технологических параметров печати – согласно ГОСТ Р 59929-2021.

2. Построение базовой *CAD*-геометрии. Прямое твердотельное моделирование внутренней структуры типа «Сетка» (рис. 1б) реализовано в КОМПАС-3*D*. Представленная параметрическая модель связывает входные параметры слайсера – ширину экструзии d_e (диаметр сопла) (мм), плотность заполнения ρ_{inf} (%) и угол укладки нитей α – с геометрическими переменными трехмерного массива САПР КОМПАС-3*D*. При построении пористой топологии принято допущение, что нити имеют форму идеального прямоугольника.

Геометрию элементарной ячейки эскиза (рис. 1б) определяли два параметра: ширина воздушного зазора ω_{gap} (мм) и шаг регулярной структуры *L* (мм). Для корректного учета плотности заполнения, выраженной в процентах, расчет производился по следующей системе



а б в

Рис. 3. Графические карты относительного удлинения (а), коэффициентов запаса по прочности (б) в образцах и результаты натурных испытаний (в)

Таблица 2. Количественное сопоставление результатов пористых образцов *PLA*

Ориентация топологии заполнения	Экспериментальная прочность $\sigma_{эксп}$, МПа	Расчетная прочность в КЭ-модели $\sigma_{расч}$, МПа	Относительная погрешность модели, %
Сетка с ортогональными нитями [–45°/+45°]	48,55	53,35	9,89 %

уравнений:

$$\begin{cases} L = \dfrac{d_e \times 100}{\rho_{inf}} \\ \omega_{gap} = L - d_e = d_e\left(\dfrac{100}{\rho_{inf}} - 1\right) \end{cases}.$$

Трехмерный пористый массив создавали через инструмент «Массив по сетке». Направляющие оси размножения элементов S_1 и S_2 взаимно ортогональны. Они развернуты на углы α = +45° (для оси S_1) и –45° (для оси S_2) относительно линии растяжения образца. Шаги размножения элементов массива зависят от шага ячейки L: $S_1 = S_2 = L$. Высота выдавливания задается точно такой же, как в управляющей программе 3*D*-принтера (обычно 0,2, 0,4, 0,6 мм). Такой подход позволяет перестраивать конечно-элементную геометрию образца в *APM FEM* при изменении режимов печати.

3. Геометрическая дискретизация в *APM FEM*. Условия нагружения задали классическим способом: жестко зафиксировали нижнюю из головок лопатки, а к противоположной (верхней) стороне приложили статическую растягивающую нагрузку вдоль продольной оси. Математическая база теории разрушения для задач механики сплошных сред представлена в фундаментальных трудах по методу конечных элементов (**МКЭ**) и механике разрушения [9].

Результаты графического моделирования и верификации

Разработанные алгоритмы прямого параметрического моделирования в системе КОМПАС-3*D* позволили повторить пористую топологию из слайсера. Статический анализ в модуле *APM FEM* подтвердил, что созданные расчетные схемы адекватны. Зоны минимального запаса прочности и относительных удлинений на расчетных картах совпадают с местами физического разрушения натурных образцов (рис. 3). Недостатком метода является то, что прямое твердотельное моделирование внутренних пространств усложняет геометрию и повышает плотность расчетной сетки, из-за чего геометрическое ядро САПР испытывает высокую нагрузку.

Натурные испытания образцов, выполненных из *PLA*-полимера при фиксированной плотности заполнения (ρ_{inf} = 75 %) и заданной траектории укладки нитей, показали, что экс-

периментальная прочность образца составляет 48,55 МПа (табл. 2), что близко к показателям сплошного монолита, поскольку перекрестная укладка нитей эффективно распределяет нагрузку, компенсируя пористость.

Сравнение расчетов с результатами натурного эксперимента (табл. 2) показало высокую сходимость. Если оценивать модель по критерию максимального разрушающего напряжения, то относительная погрешность составила всего 9,89 %. В целом для всех натурных образцов из *ABS*- и *PLA*-пластика с фиксированной плотностью заполнения этот показатель не выходил за рамки 10 %. Полученные цифры доказывают стабильность предлагаемого подхода. Созданные алгоритмы можно применять для оценки прочности пористых *FDM*-изделий.

Заключение

1. Реализованный метод прямого параметрического моделирования внутренней топологии на основе данных слайсера обеспечивает детальную визуализацию полей перемещений и коэффициентов запаса по прочности непосредственно на элементах модели.
2. Предложенный метод прямого твердотельного моделирования эффективен для высокоточного анализа критически опасных зон, стыков и локальных концентраторов напряжений. При переходе к крупногабаритным изделиям вычислительную трудоемкость метода предлагается снижать методом субмоделирования, при котором общая геометрия детали представляется в виде эквивалентной сплошной среды, а дискретная параметрическая сетка строится исключительно в зонах локализации деформаций.
3. Предложенные решения служат основой для параметрической имитации внутренней геометрии изделий на основе управляющих программ (*G*-кода) непосредственно в расчетной среде *CAE*. Адекватность разработанных параметрических алгоритмов подтверждена верификацией по результатам многолетних циклов в рамках лабораторных исследований механических свойств *FDM*-образцов, проведенных на кафедре строительных конструкций ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА» (2021–2025 гг.). Стабильная сходимость расчетных и натурных данных (с погрешностью не более 10 %, в верификационном эксперименте – 9,89 %) доказывает надежность разработанных решений и позволяет рекомендовать их для оценки прочности пористых *FDM*-изделий.

Список литературы

1. Шабанов, Е.С. Алгоритм создания опалубок и внутренних каркасов из пластика для реставрационных работ / Е.С. Шабанов // Сборник статей 74-й Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВО Костромской ГСХА. – Караваево, 2023. – С. 145–149.
2. Кондрашов, С.В. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей / С.В. Кондрашов, А.А. Пыхтин, С.А. Ларионов, А.Е. Сорокин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 10(82). – С. 04.
3. Croccolo, D. Experimental Characterization and Analytical Modelling of the Mechanical Behaviour of Fused Deposition Processed Parts Made of ABS-M30 / D. Croccolo, M. De Agostinis, G. Olmi // Computational Materials Science. – 2013. – Vol. 79. – P. 506–518.
4. Rankouhi, B. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian [и др.] // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2016. – Vol. 16. – № 3. – P. 467–481.
5. Орехов, А.В. Влияние некоторых технологических параметров печати деталей, выполненных по технологии FDM, на прочность при сжатии / А.В. Орехов // Развитие науки и практики в контексте глобальных вызовов : сборник статей по материалам 75-й Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию академии и 80-летию Костромской области, 25 января 2024 года. – Караваево : Костромская государственная сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 250–257.
6. 3D связующая нить. Обзорный путеводитель по материалам для FDM 3D-печати // Цветной Мир: блог о 3D-технологиях. – 2020. – 27 мая [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://cvetmir3d.ru/blog/3d-obzory/3d-svyazuyushchaya-nit-obzornyy-putevoditel-po-materialam-dlya-fdm-3d-pechati.

7. REC. Испытание прочности 3D-печати // Аддитивные технологии: научно-технический портал. – 2016. – 29 ноября [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://additiv-tech.ru/publications/rec-ispytanie-prochnosti-3d-pechati.html.

8. Высокоточный пруток для 3D-печати : каталог продукции / Московский завод FDplast. – Москва : FDplast, 2021. – 24 с [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.fdplast.ru/assets/files/2021/Plastik_dly_3D_pechaty_FDplast.pdf.

9. Морозов, Е.М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков. – М. : Изд-во ЛКИ (URSS), 2017. – 256 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=228252.

10. Baich, L. Study of Infill Print Design on Production Cost-Time of 3D Printed ABS Parts / L. Baich, G. Manogharan, H. Marie // International Journal of Rapid Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – No. 3–4. – P. 308–319.

11. Шмелев, А.В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А.В. Шмелев, В.И. Ивченко, А.В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4(112). – С. 1–15 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-i-raschetnoe-opredelenie-mehanicheskih-harakteristik-obraztsov-abs-plastika-pri-rastyazhenii-izgotovlennyh-metodom.

References

1. Shabanov, Ye.S. Algoritm sozdaniya opalubok i vnutrennikh karkasov iz plastika dlya restavratsionnykh rabot / Ye.S. Shabanov // Sbornik statey 74-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGBOU VO Kostromskoy GSKHA. – Karavayevo, 2023. – S. 145–149.

2. Kondrashov, S.V. Vliyaniye tekhnologicheskikh rezhimov FDM-pechati i sostava ispol'zuyemykh materialov na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki FDM-modeley / S.V. Kondrashov, A.A. Pykhtin, S.A. Larionov, A.Ye. Sorokin // Trudy VIAM. – 2019. – № 10(82). – S. 04.

5. Orekhov, A.V. Vliyaniye nekotorykh tekhnologicheskikh parametrov pechati detaley, vypolnennykh po tekhnologii FDM, na prochnost' pri szhatii / A.V. Orekhov // Razvitiye nauki i praktiki v kontekste global'nykh vyzovov : sbornik statey po materialam 75-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 75-letiyu akademii i 80-letiyu Kostromskoy oblasti, 25 yanvarya 2024 goda. – Karavayevo : Kostromskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2024. – S. 250–257.

6. 3D svyazuyushchaya nit'. Obzornyy putevoditel' po materialam dlya FDM 3D-pechati // Tsvetnoy Mir: blog o 3D-tekhnologiyakh. – 2020. – 27 maya [Electronic resource]. – Access mode : https://cvetmir3d.ru/blog/3d-obzory/3d-svyazuyushchaya-nit-obzornyy-putevoditel-po-materialam-dlya-fdm-3d-pechati.

7. REC. Ispytaniye prochnosti 3D-pechati // Additivnyye tekhnologii: nauchno-tekhnicheskiy portal. – 2016. – 29 noyabrya [Electronic resource]. – Access mode : https://additiv-tech.ru/publications/rec-ispytanie-prochnosti-3d-pechati.html.

8. Vysokotochnyy prutok dlya 3D-pechati : katalog produktsii / Moskovskiy zavod FDplast. – Moskva : FDplast, 2021. – 24 s [Electronic resource]. – Access mode : https://www.fdplast.ru/assets/files/2021/Plastik_dly_3D_pechaty_FDplast.pdf.

9. Morozov, Ye.M. Metod konechnykh elementov v mekhanike razrusheniya / Ye.M. Morozov, G.P. Nikishkov. – M. : Izd-vo LKI (URSS), 2017. – 256 s. [Electronic resource]. – Access mode : https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=228252.

10. Baich, L. Study of Infill Print Design on Production Cost-Time of 3D Printed ABS Parts / L. Baich, G. Manogharan, H. Marie // International Journal of Rapid Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – No. 3–4. – P. 308–319.

11. Shmelev, A.V. Eksperimental'noye i raschetnoye opredeleniye mekhanicheskikh kharakteristik obraztsov ABS-plastika pri rastyazhenii, izgotovlennykh metodom 3D-pechati / A.V. Shmelev,

V.I. Ivchenko, A.V. Talaluyev // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. – 2021. – № 4(112). – S. 1–15 [Electronic resource]. – Access mode : https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-i-raschetnoe-opredelenie-mehanicheskih-harakteristik-obraztsov-abs-plastika-pri-rastyazhenii-izgotovlennyh-metodom.

© А.В. Орехов, 2026

УДК 621.822

С.В. БОРИСОВ, Ю.Г. НИКИШИНА
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань

ГИБРИДНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ВИБРАЦИОННЫМ И ТЕМПЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ

Ключевые слова: вибрация; диагностика состояния; износ; искусственный интеллект; нефтехимическое машиностроение; подшипник скольжения; температура; трение; цифровой двойник.

Аннотация. Предложен гибридный цифровой двойник подшипника скольжения, предназначенный для мониторинга технического состояния оборудования нефтехимических производств. Исследуется метод, в котором физическая модель накопления износа и тепловыделения дополняется модулем машинного обучения, анализирующим полученные вибрационные и температурные данные. Гипотеза интеграции известных трибологических закономерностей в процесс диагностики предаварийных состояний позволяет компенсировать типичную для промышленности нехватку размеченных данных. Решается задача формализации процесса износа при переменных нагрузках и создания классификатора, использующего спектральные и статистические признаки износа в сочетании с динамикой нагрева подшипника. Связывание экспериментальных и статистических оценок выполнено по схеме позднего слияния, где вклад каждой подсистемы адаптивно пересчитывается в зависимости от достоверности текущих измерений. Такой подход позволил снизить вероятность ложных диагностических срабатываний, характерную для статистических моделей, и повысить чувствительность к ранним стадиям контактных повреждений. Экспериментальные исследования на стендовых данных, имитирующих загрязнение смазки и температурные колебания, подтвердили преимущество по точности гибридного подхода перед чисто физическими или чисто статистическими методами. В результате сформирована практическая схема цифрового двойника, адаптированная к условиям нефтехимического машиностроения. Показано, что предложенное решение обеспечивает устойчивую диагностику в широком диапазоне режимов работы и создает основу для внедрения стратегии обслуживания по фактическому состоянию. Полученные результаты подтверждают перспективность гибридных цифровых двойников как инструмента повышения надежности оборудования в агрессивных средах.

Введение

Подшипники скольжения широко применяются в нефтехимическом машиностроении благодаря высокой несущей способности, демпфирующим свойствам и способности работать в условиях значительных нагрузок и неблагоприятной внешней среды [2]. Вместе с тем именно эти узлы часто становятся критическими элементами отказа из-за износа, перегрева, нарушения режима смазки и накопления повреждений контактных поверхностей. Для оборудования нефтехимических производств характерны переменные режимы работы, температурные колебания, присутствие загрязняющих частиц и химически активных сред, что ускоряет деградацию подшипниковых опор и снижает их ресурс [3].

Традиционные методы контроля технического состояния подшипников скольжения, основанные на периодических осмотрах, из-

мерениях вибрации или температурного поля, не всегда позволяют своевременно выявить начальные стадии износа и предсказать развитие дефекта [1]. В этих условиях особую актуальность приобретают цифровые технологии, в том числе цифровые двойники и методы искусственного интеллекта, позволяющие не только фиксировать отклонения, но и моделировать эволюцию состояния объекта в процессе эксплуатации. Современные исследования в области *smart manufacturing* и *predictive maintenance* показывают, что наиболее устойчивые результаты достигаются при объединении физически обоснованных моделей с *data-driven* методами [6; 7]. Такой гибридный подход позволяет совместить интерпретируемость и устойчивость физического моделирования с адаптивностью алгоритмов машинного обучения. Для подшипников скольжения это особенно важно, поскольку их деградация определяется не только кинематическими и нагрузочными параметрами, но и сложной совокупностью тепловых, трибологических и динамических факторов [4].

Целью настоящей статьи является разработка и обоснование концепции гибридного цифрового двойника подшипника скольжения, объединяющего физическую модель трения и износа с *AI*-модулем оценки состояния по вибрационным и температурным данным. Научная гипотеза исследования состоит в том, что интеграция физической модели трения и износа с алгоритмами искусственного интеллекта, использующими совместный анализ вибрационных и температурных данных, позволяет повысить достоверность оценки технического состояния подшипника скольжения по сравнению с использованием только физических моделей или исключительно *data-driven* методов.

Научная новизна работы заключается в разработке архитектуры гибридного цифрового двойника подшипника скольжения, объединяющей физически интерпретируемую модель деградации трибосистемы и интеллектуальный модуль анализа диагностических сигналов. В отличие от существующих решений предложенный подход ориентирован на эксплуатационные условия нефтехимического машиностроения и обеспечивает совместную обработку механических и тепловых диагностических признаков в рамках единой системы оценки состояния.

Постановка задачи и концепция цифрового двойника

Рассматривается подшипниковый узел скольжения, работающий в составе нефтехимической машины при переменной нагрузке, повышенной температуре и возможном загрязнении смазочного материала. Входными данными цифрового двойника являются временные ряды вибрационного сигнала, температура в зоне подшипника, а также эксплуатационные параметры режима работы. Выходом системы являются индекс технического состояния, оценка уровня износа и прогноз изменения состояния на ближайшем интервале времени.

Предлагаемый цифровой двойник включает два взаимосвязанных уровня. Первый уровень представляет собой физическую модель трения и износа, описывающую эволюцию контактного состояния подшипника. Второй реализован средствами искусственного интеллекта и предназначен для обработки диагностических сигналов, извлечения информативных признаков и классификации состояния узла. Интеграция уровней осуществляется на этапе принятия решения: результаты физического моделирования корректируются данными мониторинга, а *AI*-оценка интерпретируется через параметры деградации, полученные из физической модели.

Физическая модель трения и износа

Физическая часть цифрового двойника основана на представлении о том, что деградация подшипника скольжения сопровождается увеличением контактного давления, ухудшением условий смазки и ростом тепловыделения в зоне трения [3; 4]. При развитии износа уменьшается толщина смазочного слоя, увеличивается коэффициент трения и возникает дополнительный температурный отклик, связанный с ростом потерь на трение [1; 2].

Для описания накопления износа можно использовать обобщенную зависимость:

$$W = k \cdot \frac{F \cdot s}{H},$$

где W – величина износа; k – коэффициент изнашивания; F – нагрузка; s – путь трения; H – твердость материала пары трения [3].

Тепловыделение в зоне контакта можно представить как:

$$Q = \mu \cdot F \cdot v,$$

где Q – мощность тепловыделения; μ – коэффициент трения; F – нормальная нагрузка; v – относительная скорость скольжения [4].

В реальном эксплуатационном процессе параметр μ не является постоянным, а изменяется в зависимости от температуры, состояния поверхности, качества смазки и загрязнения среды [1]. Поэтому физическая модель в рамках цифрового двойника должна рассматриваться как адаптивная, то есть обновляемая по мере поступления данных мониторинга. Такой подход позволяет использовать физическую модель не только как статическое описание процесса, но и как источник априорных знаний для дальнейшей *AI*-оценки состояния.

Дополнительно физическая модель может формировать интегральный индикатор деградации D_f, который возрастает с увеличением температуры, вибрационной активности и оценочного износа. Тогда состояние подшипника может быть представлено как функция:

$$S = f(D_f, X_{AI}),$$

где X_{AI} – признаки, выделенные *AI*-модулем.

AI-оценка технического состояния

AI-часть цифрового двойника предназначена для анализа вибрационных и температурных данных, поступающих с подшипникового узла в процессе работы [6; 7]. Вибрация чувствительна к изменениям зазора, нестабильности контакта и росту дефектности поверхности, тогда как температура отражает изменение теплового режима и качество смазки [1]. Совместное использование этих сигналов повышает устойчивость диагностики по сравнению с применением только одного вида данных [5].

На этапе предварительной обработки выполняются фильтрация шумов, нормализация, сегментация временных рядов и выделение информативных признаков. Для вибрационного сигнала целесообразно использовать следующие характеристики: среднеквадратичное значение, пик-фактор, эксцесс, спектральную энергию и полосовые амплитуды [6]. Для температурного канала информативны абсолютный уровень температуры, скорость ее роста и температурный градиент во времени [1].

В качестве модели машинного обучения для компактной статьи может быть использован алгоритм *RandomForest* или *XGBoost*, обладающий хорошей интерпретируемостью и устойчивостью к малым выборкам [7]. Если требуется учет временной динамики, может быть применена рекуррентная нейросетевая структура, однако для практической инженерной реализации более предпочтительны модели, обеспечивающие понятную связь между входными признаками и результатом классификации [6].

Задача *AI*-модуля состоит в определении одного из состояний:

1) нормальная работа;
2) начальная стадия износа;
3) развитая деградация;
4) предаварийное состояние [5].

Таким образом, *AI*-компонент выполняет функцию интеллектуального классификатора, который дополняет физическую модель оперативной оценкой текущего состояния.

Структура инженерного *dataset*: для обучения и тестирования интеллектуального модуля формируется инженерный *dataset*, содержащий параметры функционирования подшипникового узла на различных стадиях деградации. Каждый экземпляр данных включает эксплуатационные, вибрационные, температурные и конструктивные признаки.

В состав входных признаков рекомендуется включать:

– среднеквадратичное значение вибрации *RMS*;
– пик-фактор;
– коэффициент эксцесса;
– спектральную энергию;
– амплитуды характерных частотных полос;
– среднюю температуру подшипника;
– скорость изменения температуры;
– градиент температуры;
– частоту вращения;
– нагрузку на узел;
– тип смазочного материала;
– расчетный зазор;
– коэффициент трения;
– расчетный показатель износа [1; 3].

Выходной переменной является класс технического состояния подшипника: нормальное состояние, начальный износ, развитая деградация либо предаварийное состояние [5].

Предлагаемая структура данных обеспе-

Таблица 1. Сравнение методов диагностики

Метод	Интерпретируемость	Требования к данным	Прогнозирование
Физическая модель	Высокая	Низкие	Среднее
AI-модель	Низкая	Высокие	Высокое
Гибридная модель	Высокая	Средние	Высокое

чивает совместное использование результатов физического моделирования и данных мониторинга, что повышает устойчивость модели при работе в условиях ограниченных обучающих выборок.

Стратегия объединения физической и *AI*-частей

Ключевым преимуществом гибридного цифрового двойника является возможность объединения разнородных источников информации в единую оценку состояния подшипника [5; 8]. В предложенной схеме физическая модель формирует показатель деградации, отражающий механическую и тепловую сторону процесса, а *AI*-модуль выявляет статистически значимые паттерны в сигналах вибрации и температуры.

Для объединения результатов может быть использован подход позднего слияния, при котором итоговая оценка определяется как взвешенная комбинация двух индикаторов:

$$S_{hyb} = \alpha S_f + (1-\alpha) S_{AI},$$

где S_f – оценка, полученная из физической модели; S_{AI} – результат *AI*-классификации; α – вес физического компонента [8].

Такой механизм позволяет адаптировать вклад каждой части в зависимости от доступности данных, режима работы и степени доверия к модели. В условиях недостатка исторических аварийных данных физическая часть повышает устойчивость оценки, а *AI*-модуль обеспечивает чувствительность к скрытым изменениям состояния [6; 7].

Экспериментальная схема и данные

Для верификации предложенного подхода может быть использован стенд или промышленный участок с подшипником скольжения, работающим в условиях переменной нагрузки [3; 4]. Измерения выполняются с помощью вибродатчика, установленного вблизи опорного узла, и термодатчика, размещенного в зоне теплового контакта [1]. Дополнительно фиксируются режимные параметры: скорость вращения, нагрузка и продолжительность работы [2].

Набор данных целесообразно разделить на несколько классов состояния, соответствующих различной степени износа [5]. На основании этих данных формируются обучающая и тестовая выборки. Если доступ к реальным промышленным данным ограничен, допустимо использовать стендовые испытания или имитационную модель с последующей частичной валидацией на эксплуатационных сигналах [1; 8].

Верификация гибридного цифрового двойника должна выполняться на нескольких уровнях.

Первый уровень включает сопоставление результатов физической модели с известными закономерностями трибологического изнашивания и тепловыделения в подшипниках скольжения [3; 4].

Второй уровень предполагает сравнение результатов диагностики с экспериментальными данными стендовых испытаний либо эксплуатационными данными промышленного оборудования [1; 2].

Третий уровень предусматривает статистическую оценку качества *AI*-модуля на независимой тестовой выборке [7; 6].

Для комплексной оценки рекомендуется использовать матрицу ошибок классификации, показатели *Accuracy*, *Precision*, *Recall* и *F*1-*score*, а также анализ устойчивости модели при изменении эксплуатационных режимов [5; 6]. Многоуровневая верификация позволяет повысить доверие к результатам цифрового двойника и обеспечить возможность его промышлен-

ного внедрения.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа свидетельствуют о перспективности использования гибридной архитектуры цифрового двойника. Совместное использование физических индикаторов деградации и интеллектуального анализа диагностических сигналов обеспечивает более устойчивую оценку состояния по сравнению с отдельным применением физических или статистических методов. Особенно значимым является повышение чувствительности системы к ранним стадиям развития дефектов, когда изменения параметров вибрации и температуры еще не достигают критических значений. Это создает предпосылки для реализации стратегии обслуживания по фактическому состоянию и снижения риска аварийных отказов оборудования нефтехимического производства.

Заключение

В работе предложена концепция гибридного цифрового двойника подшипника скольжения, ориентированного на применение в нефтехимическом машиностроении. Показано, что объединение физической модели трения и износа с *AI*-оценкой по вибрационным и температурным данным позволяет повысить интерпретируемость и точность диагностики технического состояния узла. Предложенный подход является компактным, практически ориентированным и может быть адаптирован для других узлов трения, включая уплотнения, муфты и подшипниковые опоры различного типа.

Перспективой дальнейших исследований является расширение цифрового двойника за счет учета смазочного режима, загрязнения среды, неопределенности параметров эксплуатации и внедрения прогностического блока для оценки остаточного ресурса.

Список литературы

1. Влияние температуры подачи смазочного материала на работу упорного подшипника скольжения / Н.В. Соколов, М.Б. Хадиев, П.Е. Федотов, Е.М. Федотов // Вестник машиностроения. – 2023. – № 1. – С. 47–55.

2. Испытания упорного подшипника скольжения мультипликаторного центробежного компрессора / Н.В. Соколов, Т.В. Максимов, М.Б. Хадиев, И.Р. Сагбиев // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 10-й Международной научно-технической конференции. – Омск : Омский государственный технический университет, 2020. – С. 159–160.

3. Максимов, М.Б. Оптимизация гидродинамических упорных подшипников типа Митчела / М.Б. Максимов, М.Б. Хадиев, Р.М. Галиев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 1. – С. 31–39.

4. Численная реализация математической модели процессов течения жидкости в смазочном и пограничном слоях упорных подшипников / М.Б. Хадиев, Е.М. Федотов // Теория сеточных методов для нелинейных краевых задач : материалы 3-го Всероссийского семинара. – Казань : Издательство Казанского математического общества, 2000. – С. 127–129.

5. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Springer, 2017.

6. Karniadakis, G.E. Physics-Informed Machine Learning / G.E. Karniadakis, I.G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, L. Yang // Nature Reviews Physics. – 2021. – Vol. 3. – P. 422–440.

7. Raissi, M. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations / M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686–707.

8. Tao, F. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, M. Zhang, Y. Liu, A.Y.C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15. – No. 4. – P. 2405–2415.

References

1. Vliyaniye temperatury podachi smazochnogo materiala na rabotu upornogo podshipnika skol'zheniya / N.V. Sokolov, M.B. Khadiyev, P.Ye. Fedotov, Ye.M. Fedotov // Vestnik

mashinostroyeniya. – 2023. – № 1. – S. 47–55.

2. Ispytaniya upornogo podshipnika skol'zheniya mul'tiplikatornogo tsentrobezhnogo kompressora / N.V. Sokolov, T.V. Maksimov, M.B. Khadiyev, I.R. Sagbiyev // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva : materialy 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. – Omsk : Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2020. – S. 159–160.

3. Maksimov, M.B. Optimizatsiya gidrodinamicheskikh upornykh podshipnikov tipa Mitchela / M.B. Maksimov, M.B. Khadiyev, R.M. Galiyev // Vestnik mashinostroyeniya. – 2012. – № 1. – S. 31–39.

4. Chislennaya realizatsiya matematicheskoy modeli protsessov techeniya zhidkosti v smazochnom i pogranichnom sloyakh upornykh podshipnikov / M.B. Khadiyev, Ye.M. Fedotov // Teoriya setochnykh metodov dlya nelineynykh krayevykh zadach : materialy 3-go Vserossiyskogo seminara. – Kazan' : Izdatel'stvo Kazanskogo matematicheskogo obshchestva, 2000. – S. 127–129.

© С.В. Борисов, Ю.Г. Никишина, 2026

УДК 681.5.015:621.914

А.А. ЗАРУКИН, Д.А. ЗИНЧЕНКО, В.А. БЕЛЯНКИН, Д.А. ТРЕТЬЯКОВ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТРЕХОСЕВОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С КОМПОНОВКОЙ X–Z–C

Ключевые слова: адаптивное управление; контурная ошибка; координатор подачи; моментная загрузка; общая программная координата; рекурсивный метод наименьших квадратов; согласованное управление; трехосевой центр.

Аннотация. Цель исследования – разработать адаптивную систему согласованного управления подачей центра *X–Z–C*, ограничивающую моментную загрузку при сохранении геометрии траектории. Задачи включали построение модели приводов, оценивание нагрузки и трения, синтез межкоординатной коррекции и общего координатора темпа. Гипотеза заключалась в том, что общая оценка сопротивления резанию, используемая для компенсации возмущения и изменения темпа, позволяет исключить насыщение приводов без нарушения согласованности координат. Применены многоканальный рекурсивный метод наименьших квадратов, прогнозное ограничение темпа и численное моделирование фрезерования конуса. Минимальный коэффициент темпа составил 0,7133, максимальная загрузка – 89,17 % при ограничении 90 %, насыщение отсутствовало. Максимальная и среднеквадратическая контурные ошибки составили 10,63 и 1,04 мкм, продолжительность цикла – 191,42 с. Результаты подтверждают гипотезу в пределах принятой модели.

Введение

При обработке поверхностей с одновременным движением координат *X*, *Z* и *C* геометрическая точность определяется не только ошибками отдельных приводов, но и их фазовым согласованием. Достижение одним приводом предельного момента вызывает относительное отставание координаты и искажение траектории. Заведомое снижение подачи уменьшает вероятность перегрузки, но увеличивает продолжительность обработки.

Сопротивление резанию изменяется вследствие неоднородности материала, изменения толщины срезаемого слоя и износа инструмента. Профилирование подачи с учетом ограничений процесса резания и координатных приводов позволяет повысить производительность без выхода за допустимую нагрузку [1]. Для оперативного оценивания неизвестных параметров применяется рекурсивный алгоритм с забыванием [2]. В многокоординатной системе оценивание сочетается с межкоординатной коррекцией и расчетом контурной ошибки [4; 5], а выполнимость задания проверяет ограничивающий координатор [3].

Цель работы – разработать систему согласованного управления осями *X*, *Z* и *C*, которая оценивает изменяющуюся нагрузку, ограничивает моментную загрузку и сохраняет геометрические соотношения между заданиями. Особенность решения состоит в использовании общей оценки сопротивления резанию одновременно для компенсации возмущения и выбора единого темпа прохождения траектории.

Объект управления и показатели качества

Объект включает линейные приводы *X*, *Z* и поворотный привод *C*. Для каждой координаты принята модель моментного контура первого порядка и жесткой механической передачи:

$$T_{M,i}\dot{M}_i + M_i = sat\left(u_i; -M_i^{доп}, M_i^{доп}\right),$$
$$J_i\dot{\omega}_i = M_i - M_{g,i} - \alpha\psi_i - M_{f,i}\sigma_i, \qquad \dot{\varphi}_i = \omega_i,$$

где $i \in \{X, Z, C\}$ – индекс координаты; $T_{M,\,i}$ – постоянная времени моментного контура (с); M_i и u_i – фактический и заданный моменты двигателя (Н · м); $M_i^{доп}$ – допустимый момент (Н · м); J_i – приведенный момент инерции (кг · м^2); ω_i и φ_i – угловая скорость (рад/с) и угол вала (рад); $M_{g,\,i}$ – гравитационный момент (Н · м); α – коэффициент нагрузки (безразмерная величина); ψ_i – расчетный момент резания при $\alpha = 1$ (Н · м); $M_{f,\,i}$ – момент трения (Н · м); σ_i – сглаженный знак скорости (безразмерная величина). Оператор $sat(x; a, b)$ ограничивает x границами a и b.

Качество управления оценивается геометрической контурной ошибкой [5] и использованием моментных возможностей:

$$\varepsilon_к(t) = \min_{0\le\mu\le1}\left\|\mathrm{r}\left(\varphi(t)\right) - \mathrm{r}_d(\mu)\right\|,$$
$$U(t) = \max_{i\in\{X,Z,C\}}\frac{|M_i(t)|}{M_i^{доп}},$$

где t – физическое время (с); $\varepsilon_к(t)$ – контурная ошибка (м); μ – параметр идеальной траектории (безразмерная величина); r и r_d – фактический и программный векторы положения точки резания (м); $\|\cdot\|_2$ – евклидова норма; $U(t)$ – наибольшая относительная загрузка приводов (безразмерная величина). Условие $U < 1$ соответствует отсутствию насыщения.

Адаптивная система управления

Задания всех приводов формируются через программную координату λ_d, изменяющуюся от нуля до единицы. Координатор изменяет скорость внутреннего времени τ, но не геометрический закон траектории:

$$\dot{\tau} = \rho, \lambda_d = \Lambda(\tau), \qquad \boldsymbol{\varphi}_d = \boldsymbol{\varphi}_0 + \mathbf{a}_\varphi\lambda_d,$$
$$\rho_{min} \le \rho \le 1,$$
$$\dot{\lambda}_d = \Lambda'(\tau)\rho, \qquad \ddot{\lambda}_d = \Lambda''(\tau)\rho^2 + \Lambda'(\tau)\dot{\rho},$$

где τ – внутреннее время (с); ρ – коэффициент темпа (безразмерная величина); λ_d – программная доля пути (безразмерная величина); $\Lambda(\tau)$ – номинальный закон движения; Λ' и Λ'' – его первая и вторая производные по τ (с$^{-1}$ и с$^{-2}$); φ_d и φ_0 – программный и начальный углы валов (рад); a_φ – полное угловое перемещение (рад); ρ_{min} – минимально допустимый коэффициент темпа.

Моменты приводов восстанавливаются по токам двигателей. После вычитания известных инерционных и гравитационных составляющих три измерительных канала образуют нормированную регрессионную модель:

$$y_i = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta} + \nu_i,$$
$$\boldsymbol{\theta} = \mathrm{col}\left(\alpha, M_{f,X}/M_s, M_{f,Z}/M_s, M_{f,C}/M_s\right).$$

Нормированная моментная невязка определяется как $y_i = (M_i - J_i d\omega_i/dt - M_{g,\,i})/M_{n,\,i}$, где $M_{n,\,i}$ – масштаб момента (Н · м); ϕ_i – вектор нормированных регрессоров; θ – вектор неизвестных параметров; $\hat{\theta}$ – его оценка; M_s – масштаб трения (Н · м); ν_i – нормированное неучтенное возмущение. Первый элемент ϕ_i равен $\psi_i/M_{n,\,i}$, а элемент канала трения – $M_s\sigma_i/M_{n,\,i}$.

Строки X, Z и C последовательно обрабатываются рекурсивным методом наименьших квадратов (**РМНК**) с переменным весом предшествующих данных [2]:

$$\mathbf{K}_i = \frac{\mathbf{P}^-\boldsymbol{\phi}_i}{\beta_c + \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^-\boldsymbol{\phi}_i}, \qquad \hat{\boldsymbol{\theta}}^+ = \hat{\boldsymbol{\theta}}^- + \mathbf{K}_i\left(y_i - \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\theta}}^-\right),$$
$$\mathbf{P}^+ = \frac{\mathbf{P}^- - \mathbf{K}_i\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{P}^-}{\beta_c},$$

где K_i – безразмерный вектор усиления; P – безразмерная ковариационная матрица; β – безразмерный коэффициент забывания за полный трехканальный шаг; $\beta_c = \beta^{1/3}$ – коэффициент забывания при обработке одного канала; I_4 – единичная матрица четвертого порядка.

Положения приводов нормируются как $\lambda_i = (\varphi_i - \varphi_{0,\,i})/a_{\varphi i}$, где λ_i – выполненная доля пути i-й координаты; $\varphi_{0,\,i}$ – начальный угол вала (рад); $a_{\varphi i}$ – полное угловое перемещение (рад). Средние нормированные положение и скорость обозначены $\bar{\lambda} = (\lambda_X + \lambda_Z + \lambda_C)/3$ и $\bar{\dot{\lambda}} = (\dot{\lambda}_X + \dot{\lambda}_Z +$

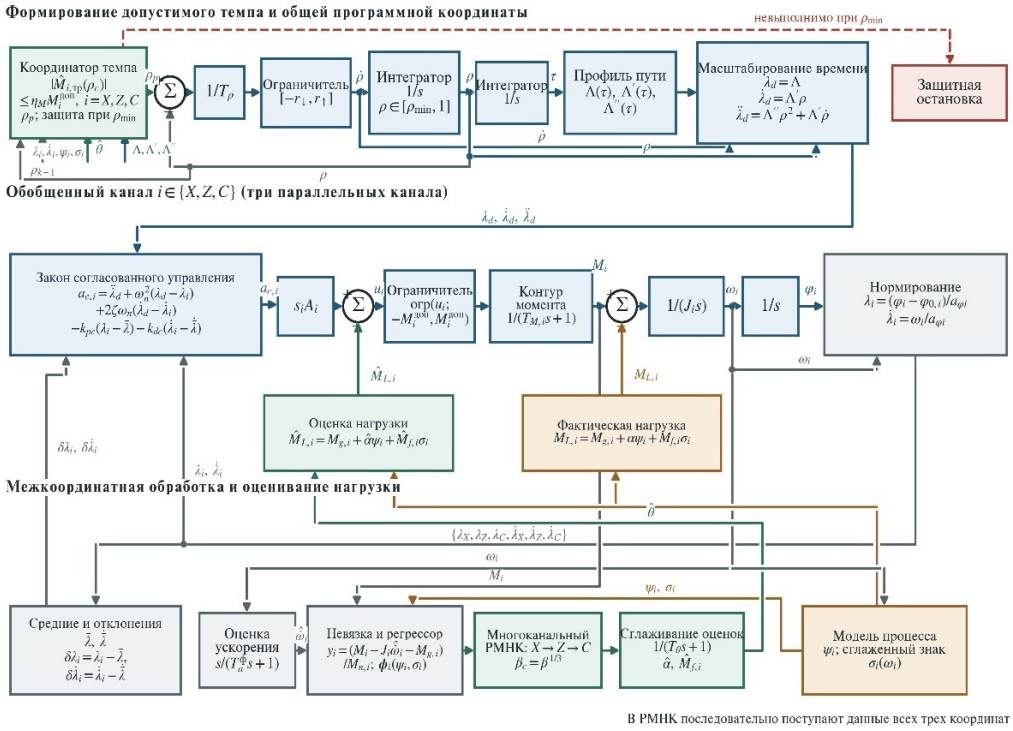


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы согласованного управления *X–Z–C*

$\dot{\lambda}_C$)/3. Для каждой оси применяются следящая и межкоординатная коррекции [4; 5]:

$$a_{c,i} = \ddot{\lambda}_d + \omega_n^2(\lambda_d - \lambda_i) + 2\zeta\omega_n(\dot{\lambda}_d - \dot{\lambda}_i) - k_{pc}(\lambda_i - \bar{\lambda}) - k_{dc}(\dot{\lambda}_i - \dot{\bar{\lambda}}),$$

$$u_i = M_{g,i} + s_i A_i a_{c,i} + \hat{\alpha}\psi_i + \hat{M}_{f,i}\sigma_i,$$

где $a_{c,\,i}$ – требуемое нормированное ускорение ($с^{-2}$); ω_n – частота контура (рад/с); ζ – коэффициент демпфирования; k_{pc} и k_{dc} – коэффициенты межкоординатной коррекции ($с^{-2}$ и $с^{-1}$); A_i – коэффициент приведения ускорения к моменту (Н · м · $с^2$); s_i – знак направления передачи; $\hat{\alpha}$ и $M_{f,\,i}$ – оценки коэффициента нагрузки и момента трения.

Координатор определяет наибольший темп, при котором прогноз моментов не превышает рабочую долю физических пределов [1; 3]:

$$\rho_p(k) = \max_{\rho_c} \rho_c, \qquad \rho_{min} \le \rho_c \le 1,$$

$$\max_{i \in \{X,Z,C\}} \frac{\left|\hat{M}_{i,тр}\left(k; \rho_c, \hat{\boldsymbol{\theta}}_k\right)\right|}{M_i^{доп}} \le \eta_M,$$

$$\alpha_{без} = \mathrm{sat}(\hat{\alpha} + \Delta\alpha; \alpha_{min}, \alpha_{max}),$$

$$\dot{\rho} = \mathrm{sat}\left(\frac{\rho_p - \rho}{T_\rho}; -r_\downarrow, r_\uparrow\right).$$

Для проверяемого темпа ρ_c прогноз требуемого момента задается выражением $M_{i,\,тр} = M_{g,\,i} + s_i A_i a_{c,\,i}^{пр}(\rho_c) + \alpha_{без}\psi_i + M_{f,\,i}\sigma_i$, где $M_{i,\,тр}$ – прогнозируемый требуемый момент *i*-го привода (Н · м); $a_{c,\,i}^{пр}$ – прогнозируемое нормированное ускорение ($с^{-2}$); $\alpha_{без} = sat(\hat{\alpha} + \Delta\alpha; \alpha_{min}, \alpha_{max})$; $\Delta\alpha$ – запас оценки; α_{min} и α_{max} – границы коэффициента нагрузки; η_M – рабочая доля допустимого момента; T_ρ – постоянная времени координатора (с); $r\downarrow$ и $r\uparrow$ – предельные скорости уменьшения и увеличения темпа ($с^{-1}$); k – номер дискретного шага. Для каждого кандидата вычисляются $\dot{\rho}_c = sat((\rho_c - \rho_{k-1})/T_\rho; -r\downarrow, r\uparrow)$ и прогноз фактического темпа на следующий шаг $\tilde{\rho}_c = sat(\rho_{k-1} + \Delta t\dot{\rho}_c; \rho_{min}, 1)$, где ρ_{k-1} – фактический коэффициент темпа на предыдущем шаге; Δt – шаг интегрирования (с). Затем $\dot{\lambda}_d$ =

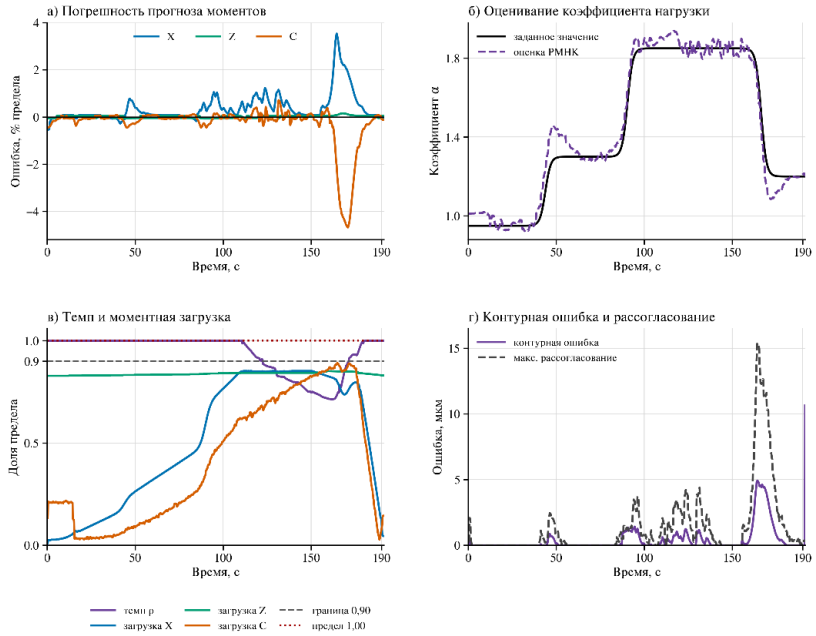


Рис. 2. Результаты моделирования адаптивной системы: а – погрешность прогноза моментов сопротивления; б – оценивание коэффициента нагрузки; в – общий коэффициент темпа и моментная загрузка приводов; г – контурная ошибка и максимальное межкоординатное рассогласование

$\Lambda'\tilde{\rho}_c$ и $\ddot{\lambda}_d = \Lambda''\rho_c^{\,2} + \Lambda'\dot{\rho}_c$.

Структурная схема системы приведена на рис. 1. В ней отдельно показаны динамика общего коэффициента темпа, формирование программной координаты, силовая часть обобщенного канала, межкоординатная коррекция и контур оценивания.

На рис. 1 приведен обобщенный канал $i \in \{X, Z, C\}$. Здесь λ_i и $\dot{\lambda}_i$ – нормированные положение и скорость; $\delta\lambda_i = \lambda_i - \bar{\lambda}$ и $\delta\dot{\lambda}_i = \dot{\lambda}_i - \bar{\dot{\lambda}}$ – межкоординатные отклонения. $M_{L,\,i} = M_{g,\,i} + \alpha\psi_i + M_{f,\,i}\sigma_i$ и $M_{L,\,i} = M_{g,\,i} + \hat{\alpha}\psi_i + M_{f,\,i}\sigma_i$ – фактический и оцененный моменты сопротивления (Н · м); $\hat{\dot{\omega}}_i$ – фильтрованная оценка углового ускорения (рад/с^2). Рекуррентный метод наименьших квадратов (**РМНК**) формирует $\hat{\alpha}$ и $M_{f,\,i}$ для компенсации и координатора.

Имитационная модель и программа эксперимента

Модель реализована как причинная дискретная структура. Задатчик, координатор и РМНК представлены вычислительными блоками; моментные контуры – апериодическими звеньями первого порядка; механические координаты – интеграторами; физические пределы – ограничителями.

Фрезерование конической поверхности моделируется от вершины к основанию. Связь нормированных координат с положением точки резания имеет вид:

$$q_x = R_b\lambda_x, \qquad q_z = H\left(1 - \lambda_z\right), \qquad q_c = 2\pi N\lambda_c,$$

где q_X и q_Z – линейные координаты точки резания (м); q_C – угол заготовки (рад); $R_b = 0{,}100$ м – радиус основания конуса; $H = 0{,}300$ м – высота конуса; $N = 40$ – число оборотов за проход. Номинальная скорость изменяется по трапецеидальному закону: разгон и торможение продолжаются по 15 с, равномерный участок – 150 с; номинальная длительность T_0 равна 180 с.

Для расчета приняты следующие исходные данные: шаг интегрирования $\Delta t = 0{,}005$ с; период обновления РМНК $T_\text{Р} = 0{,}020$ с; коэффициенты приведения $A_X = 0{,}02593$, $A_Z = 0{,}11668$ и $A_C = 4{,}52705$ Н · м · с^2; гравитационные моменты $(M_{g,\,X}, M_{g,\,Z}, M_{g,\,C}) = (0;\ 0{,}11710;\ 0)$ Н · м; постоянные моментных контуров $T_{M,\,X} = T_{M,\,Z} = T_{M,\,C} = 0{,}030$ с; допустимые моменты $(M_X^{\text{доп}}, M_Z^{\text{доп}}, M_C^{\text{доп}}) = (0{,}00470;\ 0{,}140;\ 0{,}0100)$ Н · м; $\omega_n = 10$ рад/с; $\zeta = 0{,}90$; $k_{pc} = 60$ с$^{-2}$; $k_{dc} = 8$ с$^{-1}$.

Параметры адаптации и координатора: $M_{n,\,i} = M_i^{\text{доп}}$; $M_s = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ Н · м; $\beta = 0{,}9975$ на полный трехканальный шаг; $T_\theta = 0{,}20$ с – постоянная времени сглаживания оценок РМНК; $T_a^{\phi} = 0{,}080$ с – постоянная времени фильтра оценки ускорения; $\alpha_{min} = 0{,}50$; $\alpha_{max} = 2{,}20$; $\rho_{min} = 0{,}35$; $\eta_M = 0{,}90$; $\Delta\alpha = 0{,}12$; $T_\rho = 0{,}60$ с; $r{\downarrow} = 0{,}080$ с$^{-1}$; $r{\uparrow} = 0{,}025$ с$^{-1}$.

Сценарий содержит уровни фактического коэффициента нагрузки 0,95; 1,30; 1,85 и 1,20. Переходы расположены при $\lambda = 0{,}22$, 0,50 и 0,90 и сглажены гиперболическим тангенсом. Начальные моменты трения X, Z и C равны 0,120; 0,180 и 0,240 мН · м; при $\lambda = 0{,}62$ они возрастают до 0,160, 0,220 и 0,300 мН · м.

Для вычисления контурной ошибки цилиндрические координаты преобразуются в вектор $r(t) = [q_X cos(q_C);\ q_X sin(q_C);\ q_Z]^T$. Идеальная спираль задается вектором $r_d(\mu) = [R_b \mu cos(2\pi N\mu);\ R_b \mu sin(2\pi N\mu);\ H(1 - \mu)]^T$, где $\mu \in [0;\ 1]$ – параметр траектории. Контурная ошибка равна минимальному расстоянию $\|r(t) - r_d(\mu)\|^2$. Агрегированное межкоординатное рассогласование определяется как $e_{max}(t) = L_g max_{i<j}|\lambda_i - \lambda_j|$, где $L_g = \sqrt{(H^2 + Rb^2)}$ – длина образующей конуса (м).

Результаты моделирования

На рис. 2а показаны погрешности прогноза моментов сопротивления $e_{M,\,i} = 100(M_{L,\,i} - M_{L,\,i})/M_i^{\text{доп}}$ (%), где $e_{M,\,i}$ – относительная погрешность прогноза момента i-го привода.

На рис. 2б оцениватель отслеживает изменения α с кратковременной динамической ошибкой на переходных участках. Среднеквадратическая ошибка после начального участка равна 0,0574, максимальная абсолютная ошибка – 0,1812; конечное значение $\hat{\alpha} = 1{,}2015$ соответствует заданному уровню 1,2. Конечные оценки моментов трения X, Z и C составили 0,1582, 0,2191 и 0,2886 мН · м.

Изменение общего коэффициента темпа и относительные моменты приводов показаны на рис. 2в; контурная ошибка и максимальное межкоординатное рассогласование – на рис. 2г.

При росте сопротивления координатор снижает ρ и сохраняет загрузку приводов ниже рабочей границы $\eta_M = 0{,}90$. Минимальное значение ρ составляет 0,7133, среднее – 0,9403. Наибольшая загрузка 89,17 % возникает в приводе C вследствие увеличения плеча силы резания при движении к основанию конуса; физические ограничения приводов не достигаются.

Продолжительность цикла составила 191,42 с, что на 6,34 % больше номинальной. Максимальные моменты приводов X, Z и C равны 0,004005; 0,119182 и 0,008917 Н · м, соответствующие загрузки – 85,22; 85,13 и 89,17 %.

Обсуждение результатов

Пики ошибки прогноза совпадают с переходами коэффициента нагрузки. Запас Δα и общее ограничение темпа предотвращают насыщение наиболее загруженного привода C, а единое масштабирование времени сохраняет согласование координат. Наибольшая контурная ошибка возникает на участке торможения вблизи конечной точки, где одновременно изменяются скорость движения и моментная нагрузка.

Результаты относятся к принятой структуре объекта, заданному возбуждению регрессоров и исследованному диапазону возмущений. Упругость, люфты, колебания не учитывались; строгая сходимость РМНК и глобальная устойчивость замкнутой системы не доказаны. Практическая реализация требует идентификации приводов, калибровки токовой оценки момента и полунатурного эксперимента.

Заключение

Предложена адаптивная система согласованного управления X, Z и C, объединяющая многоканальное оценивание нагрузки, компенсацию возмущения, межкоординатную коррекцию и общий координатор темпа. В вычислительном эксперименте минимальный коэффициент темпа составил 0,7133, максимальная загрузка – 89,17 % без насыщения, а максимальная и среднеквадратическая контурные ошибки – 10,63 и 1,04 мкм. Полученные результаты относятся к принятой дискретной модели.

Список литературы / References

1. Erkorkmaz, K. Feedrate Optimization for Freeform Milling Considering Constraints from the Feed Drive System and Process Mechanics / K. Erkorkmaz, S.E. Layegh, I. Lazoglu, H. Erdim // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 62. – No. 1. – P. 395–398.

2. Fortescue, T.R. Implementation of Self-Tuning Regulators with Variable Forgetting Factors / T.R. Fortescue, L.S. Kershenbaum, B.E. Ydstie // Automatica. – 1981. – Vol. 17. – No. 6. – P. 831–835.

3. Gilbert, E.G. Discrete-Time Reference Governors and the Nonlinear Control of Systems with State and Control Constraints / E.G. Gilbert, I. Kolmanovsky, K.T. Tan // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 1995. – Vol. 5. – No. 5. – P. 487–504.

4. Koren, Y. Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems / Y. Koren // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1980. – Vol. 102. – No. 4. – P. 265–272.

5. Yeh, S.-S. Estimation of the Contouring Error Vector for the Cross-Coupled Control Design / S.-S. Yeh, P.-L. Hsu // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2002. – Vol. 7. – No. 1. – P. 44–51.

© А.А. Зарукин, Д.А. Зинченко, В.А. Белянкин, Д.А. Третьяков, 2026

УДК 621.865.8

А.А. ЗАРУКИН, Д.А. ЗИНЧЕНКО, Д.А. ТРЕТЬЯКОВ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИБРИДНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ДВУХКООРДИНАТНЫМ РЕМЕННЫМ ПРИВОДОМ С СИНФАЗНО-ПРОТИВОФАЗНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ДВУХОСЕВЫМ НАКЛОННЫМ УЗЛОМ

Ключевые слова: гибридный манипулятор; динамическое моделирование; зубчатый ремень; кинематическая связь; математическая модель; ременный привод; синфазное управление; упругость ремня.

Аннотация. Цель исследования – разработать и проверить иерархию математических моделей гибридного манипулятора с двухкоординатным ременным приводом и двухосевым наклонным узлом. Задачи включали построение суммарно-разностной кинематики, сравнение плоских и пространственных поворотов, а также учет упругости ремня. Проверялась гипотеза о том, что такая иерархия позволяет раздельно оценивать кинематические и упругие эффекты, причем решение упругой модели при увеличении безразмерной частоты приближается к жесткой модели. Использованы матричные преобразования, энергетические якобианы, линеаризация упругих связей и численное моделирование. При углах 20° расхождение $M0$ и $M1$ составило 1,6501 мм, или 6,42 %. Максимальная ошибка упругой модели уменьшилась с 2,3296 % при $\Lambda = 20$ до 0,06356 % при $\Lambda = 100$, что подтверждает гипотезу в пределах принятых допущений.

Основные обозначения:

- α, β – углы наклона, рад;
- φ_1, φ_2 – углы валов *H-bot*, рад;
- x_c, y_c – координаты центра узла, м;
- ρ_E – положение рабочей точки, м;
- r – эффективный радиус шкива, м;
- l – расстояние до рабочей точки, м;
- m_e – приведенная модальная масса, кг;
- T_0 – монтажный преднатяг, Н;
- M, C – матрицы инерции и скоростных членов;
- K_b – матрица приращенной жесткости ремня;
- ω_n – собственная частота, рад/с;
- $\Lambda = \omega_n T$ – безразмерная частота;
- S_b – осевая жесткость ремня, Н;
- k_i – жесткость ветви, Н/м.

Введение

Гибридный манипулятор с двухкоординатным ременным приводом формирует плоское перемещение двумя приводами, закрепленными на основании. Его достоинством является отсутствие массы двигателей на подвижной каретке, однако точность зависит от трения, податливости ремня и согласованности приводных каналов [5]. Для одноконтурной схемы дополнительно известен паразитный поворот портала под действием силовой пары; его величина зависит от положения каретки и динамического режима [2]. Следовательно, суммарно-разностная кинематика сама по себе недостаточна для вывода о динамической точности.

Исследования синхронных ремней показывают, что эффективная жесткость зависит от свободной длины ветви, конструкции корда, уровня деформации и наработки [1; 11]. В более подробных моделях учитываются инерция ремня, демпфирование, контакт зубьев, преднатяг и натяжитель [6].

Отдельную проблему создает двухосевой наклонный узел. При последовательных поворотах проекции положения и тензор инерции зависят от порядка вращений; пространствен-

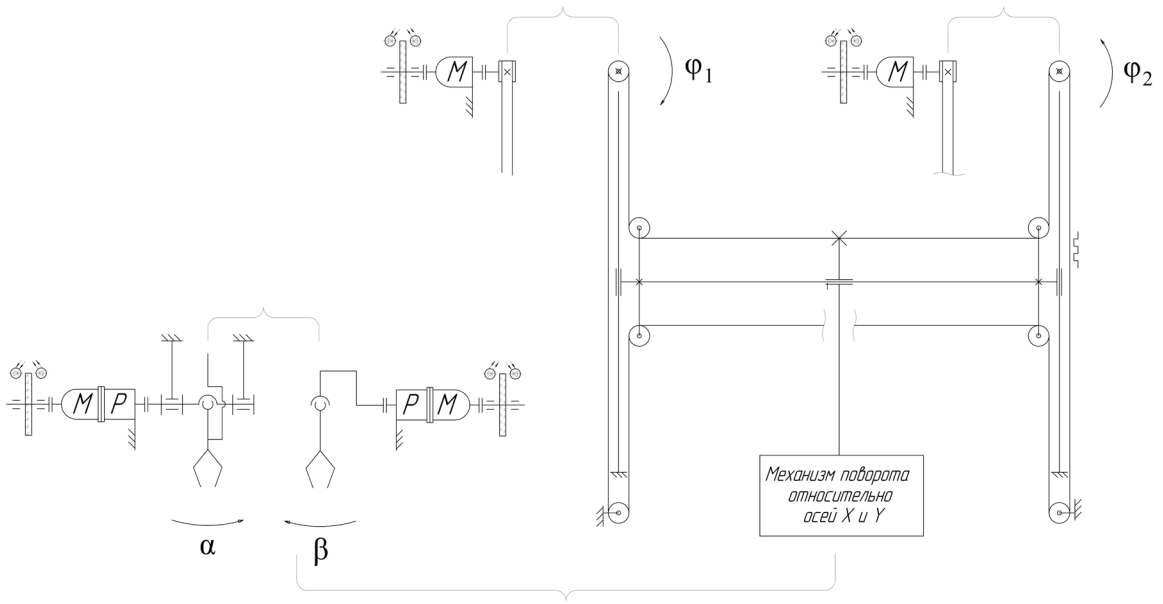


Рис. 1. Кинематическая схема гибридного манипулятора

ная формализация необходима даже при малых рабочих углах [3]. В просмотренных работах модели манипуляторов с ременным приводом, гибких ременных передач и пространственных твердых тел рассматриваются раздельно. В пределах проведенного обзора не обнаружена модель, одновременно связывающая один ременный контур манипулятора с двухкоординатным ременным приводом, синфазно-противофазное управление, последовательный двухосевой наклон и приращенную осевую податливость ветвей.

Цель работы – построить и количественно проверить иерархию моделей *M*0–*M*2 для гибридного манипулятора с двухкоординатным ременным приводом с синфазно-противофазным управлением и двухосевым наклонным узлом. Решаются задачи: вывести точную суммарно-разностную кинематику; определить расхождение независимых и последовательных наклонов; сформулировать динамику через энергетические якобианы; включить упругость ветвей без назначения неизвестных физических коэффициентов; проверить предельный переход *M*2 к *M*1.

Объект исследования и допущения

Объектом является четырехкоординатная подсистема позиционирования: поступательные координаты x_c, y_c образуются одним замкнутым зубчатым ремнем и двумя неподвижными двигателями, а углы α, β – последовательным двухосевым узлом. Кинематическая схема показана на рис. 1.

Приняты следующие допущения. В *M*0 и *M*1 ремень нерастяжим и не проскальзывает; люфт, трение, паразитный поворот портала и деформация направляющих не учитываются. В *M*2 вводится малая осевая деформация прямолинейных ветвей, но сохраняются идеальное зацепление и постоянные приведенные массы. Демпфирование в параметрическом тесте равно нулю, чтобы не приписывать неизмеренное затухание конструкции. Порядок наклонов $R_y(\beta)$ $R_x(\alpha)$ является модельным предположением.

Математическая модель. Синфазно-противофазная кинематика

При выбранных положительных направлениях валов жесткая ременная связь записывается как:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \frac{r}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При $\varphi_1 = \varphi_2$ движение происходит по *X*, а при $\varphi_1 = -\varphi_2$ – по *Y*; оба режима показаны на рис. 2а. Обратное отображение однозначно:

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{r}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

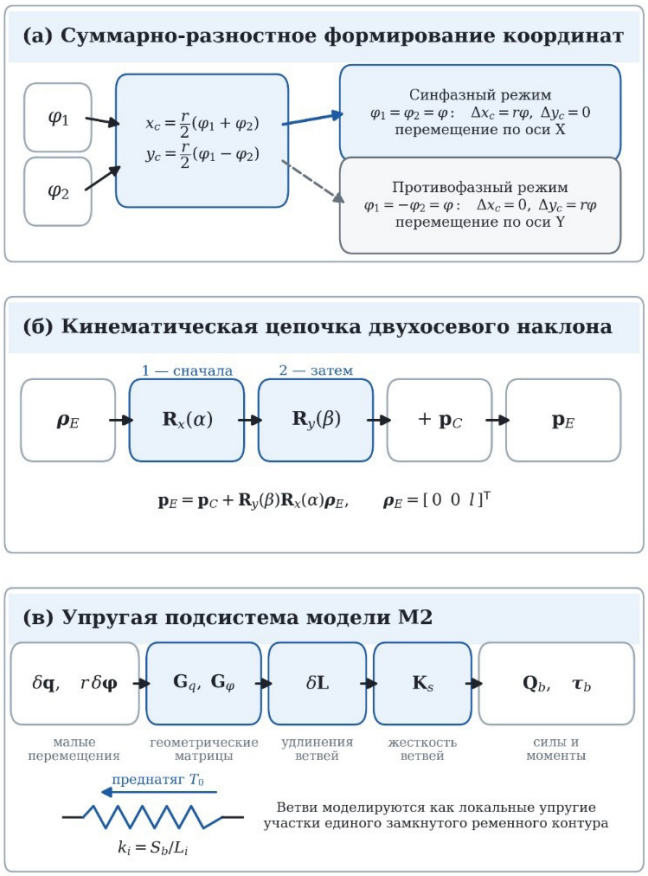


Рис. 2. Структурная декомпозиция модели: а) суммарно-разностное формирование x_c, y_c; б) последовательность поворотов наклонного узла; в) формирование упругих сил и моментов в участках единого ременного контура

Для $\rho_E = [0\ 0\ l]^T$ точное положение рабочей точки в $M1$ имеет вид: (3)

$$\mathbf{p}_E = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_x(\alpha)\,\boldsymbol{\rho}_E = \begin{bmatrix} x_c + l \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ y_c - l \cdot \sin\alpha \\ z_c + l \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \end{bmatrix}.$$

В плоской модели $M0$ приняты независимые добавки:

$$x_E^{(0)} = x_c + l \cdot \sin\beta, \qquad y_E^{(0)} = y_c - l \cdot \sin\alpha. \quad (4)$$

Сопоставление (3) и (4) изолирует только эффект последовательности наклонов и не смешивает его с ошибками привода. Порядок преобразований показан на рис. 2.

Пространственная динамика M1

Обобщенные координаты определены вектором $q = [x_c y_c \alpha\beta]^T$. Для каждого тела строятся якобианы центра масс $J_{v,\,i}$ и угловой скорости $J_{\omega,\,i}$. При принятом порядке поворотов угловая скорость наклонного звена в неподвижной системе равна:

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \cdot \cos\beta \\ \dot{\beta} \\ -\dot{\alpha} \cdot \sin\beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Кинетическая энергия и матрица инерции имеет вид:

$$T_k = \tfrac{1}{2}\textstyle\sum_i \left(m_i \mathbf{v}_i^{\top}\mathbf{v}_i + \boldsymbol{\omega}_i^{\top}\mathbf{R}_i\mathbf{I}_i\mathbf{R}_i^{\top}\boldsymbol{\omega}_i\right),$$
$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \textstyle\sum_i \left(m_i \mathbf{J}_{v,i}^{\top}\mathbf{J}_{v,i} + \mathbf{J}_{\omega,i}^{\top}\mathbf{R}_i\mathbf{I}_i\mathbf{R}_i^{\top}\mathbf{J}_{\omega,i}\right). \quad (6)$$

Такой способ согласуется с пространственной динамикой твердых тел [3]. Гравита-

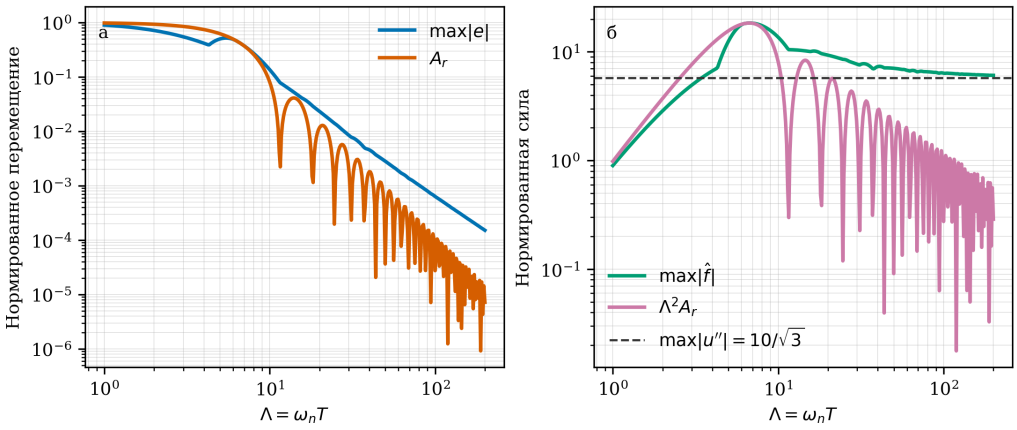


Рис. 3. Максимальная и остаточная ошибка (а), максимальная и остаточная нормированная сила (б) редуцированного упругого канала

ционный потенциал формируется по высотам центров масс. Уравнения $M1$ записываются в стандартном виде:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\,\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\,\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau}. \qquad (7)$$

Приращенная упругая модель M2

Пусть $L(q,\ \varphi)$ – вектор свободных длин прямолинейных участков замкнутого контура. В окрестности номинального положения приращения длин определяются геометрическими матрицами:

$$\delta\mathbf{L} = \mathbf{G}_q\,\delta\mathbf{q} + \mathbf{G}_\varphi\, r\,\delta\boldsymbol{\varphi}. \qquad (8)$$

При осевой жесткости $S_b = E \cdot A$ жесткость ветви длиной L_i равна $k_i = S_b/L_i$, что отражает зависимость эффективной жесткости от длины. Тогда:

$$\mathbf{K}_s = \operatorname{diag}\left(\frac{S_b}{L_1},\ \ldots,\ \frac{S_b}{L_n}\right), \qquad V_b = \frac{1}{2}\,\delta\mathbf{L}^{\mathsf{T}}\mathbf{K}_s\delta\mathbf{L}, \qquad (9)$$

$$\mathbf{Q}_b = -\mathbf{G}_q^{\mathsf{T}}\mathbf{K}_s\delta\mathbf{L}, \qquad \boldsymbol{\tau}_b = -r\,\mathbf{G}_\varphi^{\mathsf{T}}\mathbf{K}_s\delta\mathbf{L}. \qquad (10)$$

Преднатяг T_0 должен задавать исходное напряженное состояние и ограничение положительности натяжений. После линеаризации поступательного канала около фиксированной конфигурации модальные частоты определяются задачей:

$$\mathbf{K}_b\mathbf{v}_j = \omega_j^2\mathbf{M}_p\mathbf{v}_j, \qquad \mathbf{K}_b = \mathbf{G}_q^{\mathsf{T}}\mathbf{K}_s\mathbf{G}_q. \qquad (11)$$

Для гладкого планирования движения применяются полиномы пятой степени [4]. Зададим движение через безразмерную функцию хода $s(\tau)$ как:

$$s(\tau) = 10\tau^3 - 15\tau^4 + 6\tau^5. \qquad (12)$$

Сравнение $M0$ и $M1$ выполняется аналитически на прямоугольнике $|\alpha|, |\beta| \le 20°$. Для проверки $M2$ выделена одна декуплированная мода с постоянными m_e, k_e. Физические координаты нормируются на амплитуду Δu, ошибка определяется как $e = u - \bar{x}$. После замены времени получается:

$$e'' + \Lambda^2 e = u'', \qquad e(0) = e'(0) = 0, \qquad \Lambda = \omega_n T, \quad \omega_n = \sqrt{k_e/m_e}, \qquad (13)$$

где штрих означает производную по τ, а $u = s(\tau)$. После $\tau = 1$ вход удерживается постоянным. Точное решение на интервале движения вычисляется как:

$$e(\tau) = \frac{1}{\Lambda}\int_0^\tau \sin[\Lambda(\tau-\zeta)]\,u''(\zeta)\,d\zeta. \qquad (14)$$

Используются показатели:

$$E_{\max} = \max|e|, \qquad E_{\mathrm{RMS}} = \left(\int_0^1 e^2\,d\tau\right)^{1/2},$$
$$A_r = \sqrt{e^2(1) + [e'(1)/\Lambda]^2}, \qquad (15)$$
$$\hat{F}_{\max} = \max|\Lambda^2 e|, \qquad \hat{F}_r = \Lambda^2 A_r.$$

Здесь $\Lambda^2 e = F_e/(m_e \Delta u/T^2)$ – результирующая модальная сила, а не натяжение отдельной ветви.

Результаты

Из (3) и (4) получаем:

$$\Delta \mathbf{p}_{01}^{XY} = \begin{bmatrix} l \cdot \sin\beta \cdot (1 - \cos\alpha) \\ 0 \end{bmatrix}. \qquad (16)$$

На заданной области глобальный максимум достигается при $|\alpha| = |\beta| = 20°$:

$$D_{\max}^{0/1} = 0{,}08 \cdot \sin 20° \cdot (1 - \cos 20°) = 1{,}6501 \text{ мм}. \qquad (17)$$

При $\alpha = \beta = 20°$ наклонная добавка по X равна 27,3616 мм в $M0$ и 25,7115 мм в $M1$; $M0$ больше на 6,4178 %.

Результаты для выбранных значений Λ приведены на рис. 3.

При $\Lambda = 20$ максимальное отклонение равно 2,3296 % модальной амплитуды, при $\Lambda = 100$ – 0,06356 %. Однако малое отклонение по перемещению не означает совпадения сил. Пик жесткой реакции для (12) равен $max|u''| = 10/\sqrt{3} = 5{,}7735$. При $\Lambda = 10$ получено $F_{max} = 13{,}6259$, то есть отношение составляет 2,3601; при $\Lambda = 100$ оно равно 1,1008.

Остаточная амплитуда немонотонна: $A_r(50) = 1{,}2261 \cdot 10^{-5}$, тогда как $A_r(100) = 2{,}4499 \cdot 10^{-5}$. Минимумы обусловлены фазой выбранного профиля, а не затуханием.

$M2$ переходит к $M1$ по перемещению, а упругая сила – к реакции жесткой связи. Расчет выполнен по точному решению на 20 001 временном узле и 360 значениях $\Lambda \in [1; 200]$. Расхождение с *DOP*853 по e, e' не превысило $1{,}92 \cdot 10^{-13}$; удвоение сетки изменило E_{max}, E_{RMS}, F_{max} не более чем на $2{,}62 \cdot 10^{-10}$, $6{,}59 \cdot 10^{-10}$ и $1{,}11 \cdot 10^{-7}$ соответственно.

Сравнение и обсуждение

$M0$ совпадает с $M1$ в первом порядке по малым углам, но при $|\alpha| = |\beta| = 20°$ завышает наклонную добавку X на 6,42 %. $M0$ пригодна для плоской оценки, $M1$ – для пространственного положения и инерционных связей; $M1$ является жестким пределом $M2$.

В отличие от детальных моделей ременной передачи [6], $M2$ не описывает контакт зубьев, массу ремня и демпфирование и не предназначена для расчета долговечности. Превышение силы при промежуточных Λ характеризует чувствительность редуцированной модели, но не доказывает резонанс конструкции. Предварительное формирование входа допустимо исследовать после определения модальных частот.

Заключение

1. Иерархия моделей гибридного манипулятора с двухкоординатным ременным приводом с синфазно-противофазным управлением и двухосевым наклонным узлом разделяет суммарно-разностную кинематику, точный последовательный наклон и осевую податливость одного ременного контура.

2. При расчетном сценарии максимум расхождения плоской модели $M0$ и пространственной модели $M1$ равен 1,6501 мм по X, что является межмодельной ошибкой.

3. В приращенной упругой модели $M2$ ошибка положения стремится к нулю при увеличении безразмерной частоты, тогда как сила сходится медленнее; размерная оценка требует измерения жесткости, преднатяга, демпфирования и модальных частот.

Список литературы / References

1. Dalgarno, K.W. Stiffness Loss of Synchronous Belts / K.W. Dalgarno, A.J. Day, T.H.C. Childs, R.B. Moore // Composites Part B: Engineering. – 1998. – Vol. 29. – No. 3. – P. 217–222.

2. Edoimioya, N. Software Compensation of Undesirable Racking Motion of H-Frame 3D Printers Using Filtered B-Splines / N. Edoimioya, K.S. Ramani, C.E. Okwudire // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 47. – Art. 102290.

3. Featherstone, R. Rigid Body Dynamics Algorithms / R. Featherstone. – New York : Springer, 2008. – IX, 272 p.

4. Flash, T. The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model / T. Flash, N. Hogan // The Journal of Neuroscience. – 1985. – Vol. 5. – No. 7. – P. 1688–1703.

5. Idà, E. An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D

Printer / E. Idà, F. Nanetti, G. Mottola // Machines. – 2022. – Vol. 10. – No. 7. – Art. 542.

6. Jia, S.S. Elastic Dynamic Analysis of Synchronous Belt Drive System Using Absolute Nodal Coordinate Formulation / S.S. Jia, Y.M. Song // Nonlinear Dynamics. – 2015. – Vol. 81. – No. 3. – P. 1393–1410.

© А.А. Зарукин, Д.А. Зинченко, Д.А. Третьяков, 2026

УДК 621.914.3:617.

А.А. ЗАРУКИН, Д.А. ЗИНЧЕНКО, Д.А. ТРЕТЬЯКОВ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

ТРЕХОСЕВОЙ ФРЕЗЕРНЫЙ ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЗИТИВОВ КУЛЬТЕПРИЕМНЫХ ГИЛЬЗ ПРИ ПРОТЕЗИРОВАНИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Ключевые слова: безгипсовая технология; культеприемная гильза; моментная нагрузка; позитив гильзы; трапецеидальный профиль; трехосевой центр; фрезерование конуса; цифровое протезирование.

Аннотация. Цель исследования – разработка специализированного центра для изготовления позитивов культеприемных гильз. Задачи состояли в построении динамической модели приводов и моделировании процесса фрезерования. Гипотеза заключалась в том, что общая программная координата обеспечивает согласованное движение осей, а расчет инерционных, гравитационных и силовых составляющих позволяет предварительно определить требуемые моменты приводов. Применены кинематический анализ, уравнения Лагранжа, расчет силы резания и численное моделирование спиральной траектории при трапецеидальном законе скорости. Получены зависимости углов, скоростей, ускорений и моментов валов. При цикле 180 с максимальные моменты X, Z и C составили 0,00317; 0,11867 и 0,00736 Н · м. Установлено, что нагрузка оси Z определяется преимущественно силой тяжести, а оси C – увеличением радиуса приложения силы резания.

Обозначения:

– a_e, a_p – ширина и глубина фрезерования (м);
– D – диаметр фрезы (м);
– f_z – подача на зуб (м/зуб);
– F_c, F_f, F_p – окружная, подающая и нормальная силы (Н);
– g – ускорение свободного падения (м/с²);
– H – высота конуса (м);
– h_X, h_Z – ход винта линейной оси за оборот (м/об);
– i_C – передаточное отношение поворотной оси;
– J_i – момент инерции элемента i (кг · м²);
– k_c – удельная сила резания (Н/м²);
– m_X, m_Z – массы подвижных узлов (кг);
– M_i – момент привода i (Н · м);
– N – число оборотов за проход;
– n_s – частота вращения шпинделя (об/мин);
– q_X, q_Z, q_C – координаты осей X, Z (м) и C (рад);
– R_b – радиус основания конуса (м);
– s_h – шаг спирали по образующей (м);
– t, t_a, t_c, T – время разгона, равномерного хода и цикла (с);
– v_f – скорость движения точки резания (м/с);
– z – число зубьев фрезы;
– κ_f, κ_p, ξ – коэффициенты составляющих силы;
– λ – доля пройденной траектории.

Введение

Индивидуальная культеприемная гильза передает нагрузку от протеза на ткани культи, поэтому ее геометрия определяет распределение давления, устойчивость и комфорт пациента [5]. Традиционный маршрут основан на гипсовом негативе, отливке позитива и его ручной корректировке; повторное изготовление требует воспроизведения промежуточной геометрии.

Цифровой маршрут сохраняет медицин-



Рис. 1. Компоновка и конструкция трехосевого центра: а – взаимное расположение координат; б – поворотная координата *C*; в – общий вид

скую корректировку, но переводит форму в воспроизводимую модель. Пенополиуретан удобен для формования или ламинирования гильзы; малая прочность материала допускает облегченный станок, однако режим должен учитывать особенности резания полимеров [6].

Предлагаемый центр не рассматривается как замена универсального промышленного оборудования. Это специализированная машина для ограниченного диапазона размеров и нагрузок, дополняющая цифровой участок протезно-ортопедического предприятия. Цель работы – обосновать компоновку *X–Z–C*, представить динамическую модель ее приводов и определить расчетные моментные нагрузки при фрезеровании контрольного конуса от вершины к основанию.

Технологический маршрут и конструкция центра

Маршрут включает 3*D*-сканирование культи; коррекцию модели в системе автоматизированного проектирования; подготовку управляющей программы; фрезерование цельного позитива; формование пробной гильзы; примерку и изготовление окончательной композитной гильзы.

Форма позитива близка к телу вращения с локальными анатомическими отклонениями. Поэтому выбрана компоновка с горизонтальной линейной координатой *X*, вертикальной координатой *Z* и поворотной координатой *C*. Подобное распределение движений уменьшает число линейных осей при полном обходе поверхности [2]. Заготовка закрепляется на поворотном столе; фреза перемещается в меридиональной плоскости.

Оси *X* и *Z* выполнены на направляющих качения и шарико-винтовых передачах [4]. Поворотная ось содержит самоцентрирующий стол, сменную пластину, ременную передачу, червячный редуктор и шаговый двигатель. Несущая рама собрана из алюминиевого профиля. Такое решение облегчает изменение рабочего диапазона, но фактическая жесткость должна быть подтверждена измерением.

Динамическая модель приводов

Модель предназначена для предварительного выбора приводов и анализа распределения нагрузок. Приняты абсолютно жесткие передачи, постоянные инерционные параметры и отсутствие трения, люфта и потерь. Заготовка вращается вокруг оси *C*, фреза перемещается по *X* и *Z*. Окружная сила резания определена по площади поперечного сечения среза [1]:

$$F_c = k_c\, a_p\, f_z\, z\, \frac{a_e}{\pi D},$$

Коэффициент k_c в демонстрационном расчете принят условно и подлежит экспериментальному определению для конкретной марки пенополиуретана.

$$F_f = \kappa_f F_c,\ F_p = \kappa_p F_c.$$

В расчете получены κ_f = 0,8594 и κ_p = 0,4138. Сила по *X* сопротивляется радиальной подаче, сила по *Z* суммируется с весом вертикального узла, а момент на заготовке равен произведению F_c на текущий радиус.

Угол вала линейного привода определяется ходом винта, а угол вала поворотного привода – передаточными отношениями:

$$\varphi_{\text{дв},X} = \frac{2\pi}{h_X} q_X, \varphi_{\text{дв},Z} = \frac{2\pi}{h_Z} q_Z, \varphi_{\text{дв},C} = i_C \cdot q_C.$$

После записи кинетической энергии подвижных узлов и применения уравнений Лагранжа [3] получены требуемые моменты валов:

$$M_{\text{дв},X} = \frac{h_X}{2\pi}\left(\left[m_X + J_X\left(\frac{2\pi}{h_X}\right)^2\right]\ddot{q}_X + \kappa_f F_c\right),$$

$$M_{\text{дв},Z} = \frac{h_Z}{2\pi}\left(\left[m_Z + J_Z\left(\frac{2\pi}{h_Z}\right)^2\right]\ddot{q}_Z + m_Z g + \kappa_p F_c\right),$$

$$M_{\text{дв},C} = \frac{1}{i_C}\left(\left[J_{\text{заг}} + J_{\text{дв},C} \cdot i_C^2\right]\ddot{q}_C + F_c \cdot R_{\text{заг}}\right).$$

Модель содержит инерционные, гравитационные и силовые составляющие, но ее параметры требуют измерения.

Моделирование фрезерования конуса

В качестве воспроизводимого теста принят конус высотой H и радиусом основания R_b. Точка контакта перемещается от вершины к основанию по спирали, параметризованной общей координатой $\lambda \in [0; 1]$:

$$\mathbf{r}(\lambda) = \begin{pmatrix} R_b\lambda\cos(2\pi N\lambda) \\ R_b\lambda\sin(2\pi N\lambda) \\ H(1-\lambda) \end{pmatrix}.$$

Расстояние между соседними витками вдоль образующей равно:

$$s_h = \frac{\sqrt{H^2 + R_b^2}}{N}.$$

Для исключения необработанных полос условие $s_h \le a_e$ проверяют в одинаковых единицах; далее обе величины сопоставляются в миллиметрах.

$$q_X = q_{X0} + R_b\lambda,\ q_Z = q_{Z0} - H\lambda,\ q_C = q_{C0} + 2\pi N\lambda.$$

Единая λ обеспечивает геометрическое согласование осей независимо от текущей скорости прохождения траектории:

$$v_{\max} = \frac{1}{t_a + t_c}, \qquad a_\lambda = \frac{v_{\max}}{t_a}.$$

Скорость и ускорение λ задаются трапецеидальным законом:

$$\dot{\lambda}(t) = \begin{cases} a_\lambda t, & 0 \le t < t_a, \\ v_{\max}, & t_a \le t < t_a + t_c, \\ a_\lambda(T - t), & t_a + t_c \le t \le T. \end{cases}$$

$$\ddot{\lambda}(t) = \begin{cases} a_\lambda, & 0 < t < t_a, \\ 0, & t_a < t < t_a + t_c, \\ -a_\lambda, & t_a + t_c < t < T. \end{cases}$$

Скорость относительного движения точки резания учитывает линейные перемещения и окружную скорость точки на текущем радиусе:

$$v_f(t) = \sqrt{\dot{q}_X^2 + \dot{q}_Z^2 + [R_b\lambda(t)\,\dot{q}_C]^2} =$$

$$\dot{\lambda}\sqrt{R_b^2 + H^2 + [2\pi N R_b\lambda(t)]^2}.$$

Поскольку при движении от вершины к основанию $\dot{\lambda} \ge 0$, модуль скорости параметра можно записать без знака абсолютной величины.

Для компактной записи вводятся приведенные параметры:

$$m_X^* = m_X + J_X\left(\frac{2\pi}{h_X}\right)^2, \qquad m_Z^* = m_Z + J_Z\left(\frac{2\pi}{h_Z}\right)^2,$$

$$J_C^* = J_{\text{заг}} + J_{\text{дв},C} i_C^2.$$

Тогда временные зависимости моментов принимают вид:

$$M_{\text{дв},X}(t) = \frac{h_X}{2\pi}\left[m_X^* R_b\ddot{\lambda}(t) + \kappa_f F_c(t)\right],$$

$$M_{\text{дв},Z}(t) = \frac{h_Z}{2\pi}\left[-m_Z^* H\ddot{\lambda}(t) + m_Z g + \kappa_p F_c(t)\right],$$

$$M_{\text{дв},C}(t) = \frac{1}{i_C}\left[J_C^* 2\pi N\ddot{\lambda}(t) + F_c(t) R_b\lambda(t)\right].$$

Полученные зависимости связывают геометрию конуса, трапецеидальный профиль и режим резания с нагрузкой каждого двигателя. Они дают теоретически необходимый момент без учета трения, коэффициента полезного дей-

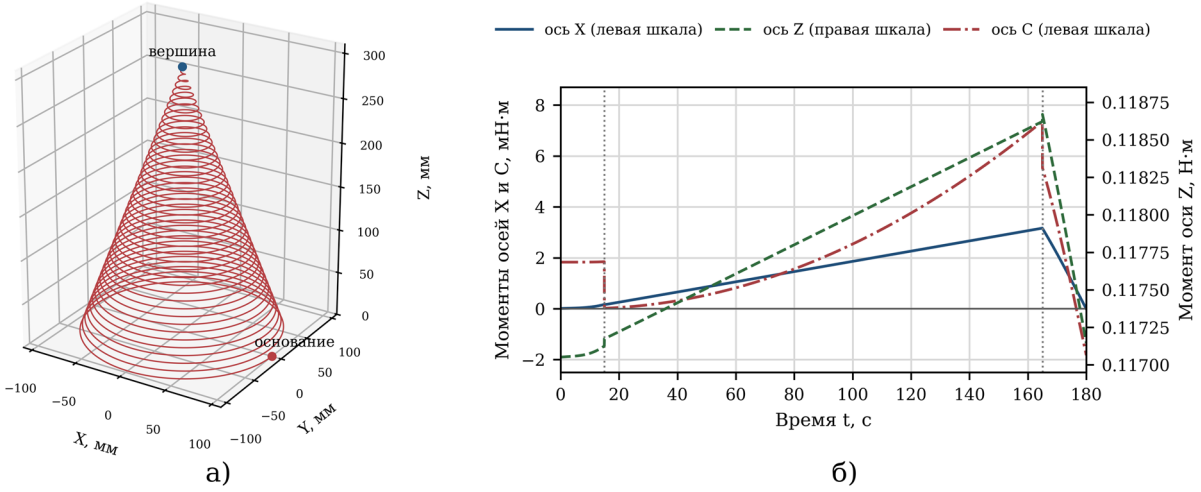


Рис. 2. Траектория фрезерования конуса: а – траектория; б – крутящие моменты приводов *X*, *Z* и *C*

ствия передач и проектного запаса.

Численные значения образуют демонстрационный расчетный набор, не полученный идентификацией изготовленного центра; при окончательном выборе приводов их следует заменить паспортными и экспериментальными параметрами.

Для расчета приняты следующие исходные данные: высота конуса $H = 0{,}300$ м; радиус основания $R_b = 0{,}100$ м; число оборотов за проход $N = 40$; длительности разгона и равномерного движения $t_a = 15$ с и $t_c = 150$ с; ходы винтов $h_X = h_Z = 0{,}005$ м/об; передаточное отношение поворотной оси $i_C = 60$; массы подвижных узлов $m_X = 10$ кг и $m_Z = 15$ кг; моменты инерции приводов $J_X = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ кг · м² и $J_Z = 3{,}0 \cdot 10^{-4}$ кг · м², заготовки $J_{заг} = 7{,}54 \cdot 10^{-4}$ кг · м² и ротора двигателя оси C $J_{дв,\,C} = 3{,}0 \cdot 10^{-4}$ кг · м²; удельная сила резания $k_c = 8{,}0$ Н/мм²; ширина фрезерования $a_e = 8$ мм; диаметр фрезы $D = 16$ мм; число зубьев $z = 2$; частота вращения шпинделя $n_s = 12\,000$ об/мин; коэффициент составляющих силы $\xi = 0{,}35$.

При принятых значениях длительность цикла равна 180 с. Шаг спирали по образующей составляет 7,91 мм и не превышает ширины фрезерования 8 мм. Расчетная траектория показана на рис. 2а.

Максимальные скорости осей *X* и *Z* составили 0,606 и 1,818 мм/с. Максимальная угловая скорость заготовки равна 1,523 рад/с, или 14,545 об/мин. Частоты вращения валов двигателей достигли 7,273 об/мин для *X*, 21,818 об/мин для *Z* и 872,727 об/мин для *C*. Максимальная скорость точки резания составила 8 724,5 мм/мин, подача на зуб – 0,3635 мм/зуб, окружная сила – 4,629 Н.

Обсуждение результатов

Для оси *Z* определяющим является гравитационный момент 0,117 Н · м; максимумы *X* и *C* возникают в конце равномерного участка. Ось *X* нагружена преимущественно силой резания. Для оси *Z* преобладает удержание узла против силы тяжести. Для оси *C* на разгоне заметна инерционная составляющая, а на равномерном участке момент растет вместе с силой резания и радиусом ее приложения. Скачки момента уменьшают заменой трапецеидального задания *S*-образным профилем.

Заключение

Для реализации безгипсовой технологии изготовления культеприемных гильз был разработан трехосевой фрезерный центр с компоновкой *X*, *Z*, *C*. Были спроектированы и рассчитаны основные узлы станка. Получены аналитические выражения кинематических параметров валов приводов и законы изменения крутящих моментов во времени.

При цикле фрезерования конической спирали продолжительностью 180 с максимальные моменты приводов *X*, *Z* и *C* составили

0,00317; 0,11867 и 0,00736 Н · м. Результаты предназначены для предварительного выбора приводов.

Разработанное оборудование может быть интегрировано в технологический процесс протезно-ортопедических предприятий.

Список литературы

1. Грубый, С.В. Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 10. – С. 26–37.
2. Дождилев, А.М. Компоновка фрезерных станков с ЧПУ / А.М. Дождилев, А.Ю. Лаврентьев, Д.Д. Кокорин, И.П. Гуляев // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2022. – № 12-2(75). – С. 126–129.
3. Ландау, Л.Д. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 5-е изд. – М. : Физматлит, 2004. – 224 с.
4. Федуков, А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение качества линейных координат станочного оборудования на базе шарико-винтовой пары и направляющих качения // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2020. – № 10(112). – С. 16–21.
5. Янковский, В.М. Медицинские аспекты протезирования пациентов после ампутации на уровне голени с использованием цифровых технологий / В.М. Янковский, М.В. Черникова, А.Д. Кузичева, Е.В. Фогт // Гений ортопедии. – 2022. – Т. 28. – № 4. – С. 495–502.
6. Alauddin, M. Plastics and their machining: A review / M. Alauddin, I.A. Choudhury, M.A. El Baradie, M.S.J. Hashmi // Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – Vol. 54. – Nos. 1–4. – P. 40–46.

References

1. Grubyy, S.V. Raschet sil i momenta rezaniya pri frezerovanii kontsevymi frezami // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – 2020. – № 10. – S. 26–37.
2. Dozhdilev, A.M. Komponovka frezernykh stankov s CHPU / A.M. Dozhdilev, A.YU. Lavrent'yev, D.D. Kokorin, I.P. Gulyayev // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2022. – № 12-2(75). – S. 126–129.
3. Landau, L.D. Mekhanika / L.D. Landau, Ye.M. Lifshits. – 5-ye izd. – M. : Fizmatlit, 2004. – 224 s.
4. Fedukov, A.G. Konstruktorsko-tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva lineynykh koordinat stanochnogo oborudovaniya na baze shariko-vintovoy pary i napravlyayushchikh kacheniya // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2020. – № 10(112). – S. 16–21.
5. Yankovskiy, V.M. Meditsinskiye aspekty protezirovaniya patsiyentov posle amputatsii na urovne goleni s ispol'zovaniyem tsifrovykh tekhnologiy / V.M. Yankovskiy, M.V. Chernikova, A.D. Kuzicheva, Ye.V. Fogt // Geniy ortopedii. – 2022. – T. 28. – № 4. – S. 495–502.

© А.А. Зарукин, Д.А. Зинченко, Д.А. Третьяков, 2026

УДК 629.7.05:681.51

А.А. ЗАРУКИН[1], Д.А. ЗИНЧЕНКО[1], Д.А. ТРЕТЬЯКОВ[1], А.М. БОРЫШНЕВ[2]
[1]ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;
[2]ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» г. Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (**БПЛА**); динамика мультикоптера; имитационное моделирование; квадрокоптер; математическая модель; ПИД-регулятор; *MATLAB Simulink.*

Аннотация. Цель исследования – разработка компьютерной модели и системы управления четырехроторным беспилотным летательным аппаратом, рассчитанным на полеты в замкнутых пространствах. Моделирование производилось средствами программы *MATLAB Simulink*. Для достижения цели решались следующие задачи: составление математической модели БПЛА, расчетно-экспериментальное определение коэффициента тяги винта, создание модели и системы управления БПЛА на основе ПИД-регулятора в *Simulink*. Получена замкнутая система нелинейных уравнений, связывающая скважность управляющих ШИМ-сигналов с ускорениями центра масс и угловыми ускорениями корпуса. На ее основе в среде *MATLAB Simulink* синтезирована каскадная система автоматического управления, в которой контур позиционирования замкнут через контуры стабилизации углов и угловых скоростей. Моделирование подтверждает отработку координатных заданий без статической ошибки.

Список обозначений:

– b – коэффициент тяги винта, Н · с²/рад²;
– C_d – коэффициент сопротивления лопасти;
– D – диаметр воздушного винта, м;
– d – коэффициент реактивного момента, Н · м · с²/рад²;
– F – суммарная сила тяги, Н;
– F_x, F_y, F_z – проекции силы тяги на оси нормальной системы координат (**НСК**), Н;
– g – ускорение свободного падения, м/с²;
– I_x, I_y, I_z – главные моменты инерции, кг · м²;
– K_v – постоянная двигателя, об/(мин · В);
– k_p, k_i, k_d – коэффициенты ПИД-регулятора;
– L – расстояние от центра масс до оси винта, м;
– l – плечо силы тяги относительно оси корпуса, м;
– M_x, M_y, M_z – управляющие моменты, Н · м;
– m – масса аппарата, кг;
– PWM_i – код скважности ШИМ i-го канала;
– T – период ШИМ, дискр.;
– U – напряжение батареи, В;
– x, y, z – координаты центра масс в НСК, м;
– θ, φ, ψ – углы тангажа, крена и рыскания, рад;
– ρ – плотность воздуха, кг/м³;
– ω_i – угловая скорость i-го ротора, рад/с.

Сокращения: БПЛА – беспилотный летательный аппарат; НСК – нормальная (земная) система координат; ОУ – объект управления; ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования; САУ – система автоматического управления; ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

Введение

Для полета мультироторных беспилотных летательных аппаратов внутри помещений распространенные навигационные решения обладают принципиальными ограничениями:

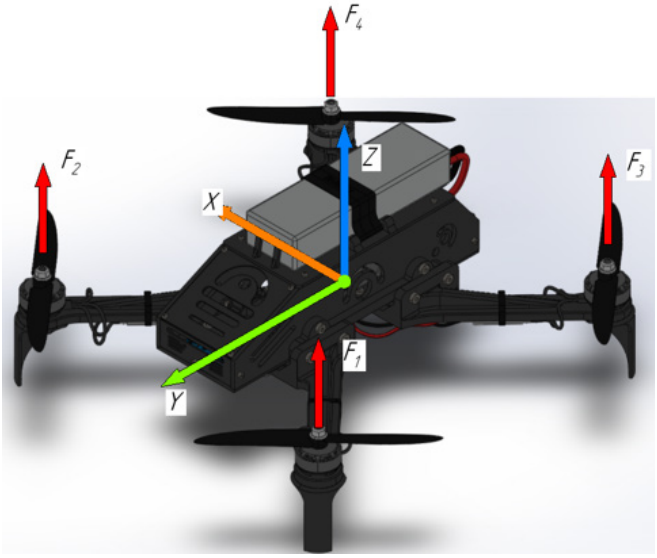


Рис. 1. Система координат квадрокоптера

точность спутниковых систем недостаточна, а устойчивость приема в закрытых объемах не гарантируется; системы технического зрения увеличивают массу и требуют значительных вычислительных ресурсов; схемы с внешними маяками требуют предварительного оборудования помещения [1; 5]. Альтернативой является управление по данным инерциальной навигационной системы, качество которого целиком определяется адекватностью математической модели объекта, использованной при синтезе регуляторов. Модели динамики квадрокоптера построены в [8; 9], подходы к оцениванию состояния систематизированы в работе [10], задачи траекторного управления рассмотрены в [1; 2]; общим для этих работ является задание параметров модели в обобщенном виде, вследствие чего результаты моделирования допускают лишь качественную интерпретацию и не переносятся на конкретное изделие.

Цель работы – разработка имитационной модели четырехроторного БПЛА, все параметры которой идентифицированы применительно к конкретной конструкции, и синтез на ее основе системы автоматического управления пространственным положением аппарата. В соответствии с этой целью в статье решаются три задачи: вывод уравнений движения при обоснованной системе допущений, идентификация параметров модели, реализация и настройка САУ в среде *MATLAB Simulink*.

Объект исследования и математическая модель

Объект исследования – четырехроторный БПЛА, выполненный по схеме «X» на базе рамы из работы [6]. Силовая установка включает четыре бесколлекторных двигателя с постоянной K_v = 2 400 об/(мин · В), питаемых от батареи напряжением U = 11,1 В; диаметр винта D = 0,1524 м; период ШИМ T = 5 000 дискрет.

Приняты допущения: аппарат – абсолютно твердое тело, оси связанной системы координат совмещены с главными центральными осями инерции; аэродинамическое сопротивление корпуса и гироскопические моменты роторов не учитываются, что обосновано полетом внутри помещения при скоростях порядка единиц метров в секунду и малостью полярных моментов инерции роторов; тяга и реактивный момент винта пропорциональны квадрату угловой скорости ротора [8; 9]; инерционность контура «регулятор – двигатель» пренебрежимо мала по сравнению с постоянными времени пространственного движения. При этом сохраняются существенные для задачи стабилизации нелинейности – тригонометрическая связь углов ориентации с проекциями тяги и квадратичная связь управляющего сигнала с тягой.

Движение описывается в нормальной системе координат *Oxyz*, относительно которой

задается программная траектория, и в связанной системе с началом в центре масс. Направления осей и нумерация винтомоторных групп приведены на рис. 1.

Уравнения поступательного и вращательного движения имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{F_x}{m} \\ \ddot{y} = \frac{F_y}{m} \\ \ddot{z} = \frac{F_z}{m} - g \\ \ddot{\varphi} = \frac{M_x}{I_x} \\ \ddot{\theta} = \frac{M_y}{I_y} \\ \ddot{\Psi} = \frac{M_z}{I_z} \end{cases}. \quad (1)$$

Сила тяги одной винтомоторной группы пропорциональна квадрату угловой скорости ротора, а угловая скорость определяется средним напряжением на обмотках, задаваемым скважностью ШИМ:

$$\begin{cases} F_i = b \cdot \omega_i^2 \\ \omega_i = U \cdot \frac{PWM_i}{T} \cdot K_v \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right) \end{cases}. \quad (2)$$

Поскольку коэффициент тяги одинаков для всех четырех идентичных групп, суммарная сила тяги равна:

$$F = b \cdot (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2). \quad (3)$$

Вектор тяги направлен по нормали к плоскости винтов и поворачивается вместе с корпусом, поэтому его проекции на оси НСК при последовательности поворотов «рыскание – тангаж – крен» составляют:

$$\begin{cases} F_x = F \cdot (\sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\Psi) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\Psi)), \\ F_y = F \cdot (\sin(\varphi) \cdot \cos(\Psi) - \cos(\varphi) \cdot (\sin(\theta) \cdot \sin(\Psi)), \\ F_z = F \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta). \end{cases} \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует, что горизонтальные проекции тяги не являются независимыми управляющими воздействиями: перемещение вдоль осей x и y достигается только за счет наклона корпуса, то есть за счет моментов относительно осей Ox и Oy. Эти моменты создаются рассогласованием тяг в соответствующих парах винтомоторных групп:

$$\begin{cases} M_x = b \cdot l \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2), \\ M_y = b \cdot l \cdot (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2), \end{cases} \quad (5)$$

где l – плечо силы тяги относительно оси корпуса; для схемы «X» оно определяется проекцией луча рамы на ось: $l = L \cdot cos(\pi/4) = L/\sqrt{2}$.

Момент рыскания создается разностью реактивных моментов винтов противоположного вращения:

$$M_z = d \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2), \quad (6)$$

где d – коэффициент реактивного момента, Н · м · с²/рад².

Момент сопротивления одного винта равен моменту силы лобового сопротивления лопасти [5]; с учетом соотношений $v = \omega \cdot D/2$ для окружной скорости конца лопасти и $A = \pi \cdot D2/4$ для ометаемой площади он приводится к виду:

$$M_{z\,i} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \cdot \frac{D}{2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot \pi \cdot \frac{D^5}{32} \cdot \omega^2 = d \cdot \omega_i^2. \quad (7)$$

Подстановка (3)–(7) в систему (1) дает замкнутую модель объекта управления, связывающую управляющие воздействия PWM_i с вектором состояния аппарата:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{b * \sum_i^4 \omega_i^2 * (\sin(\theta) * \cos(\varphi) * \cos(\Psi) + \sin(\varphi) * \sin(\Psi))}{m}, \\ \ddot{y} = \frac{b * \sum_i^4 \omega_i^2 * (\sin(\varphi) * \cos(\Psi) - \cos(\varphi) * (\sin(\theta) * \sin(\Psi)),}{m} \\ \ddot{z} = \frac{b * \sum_i^4 \omega_i^2 * \cos(\varphi) * \cos(\theta)}{m} - g, \\ \ddot{\varphi} = \frac{b * (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) * L}{I_x}, \\ \ddot{\theta} = \frac{b * (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2) * L}{I_y}, \\ \ddot{\Psi} = \frac{d * (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2)}{I_z}, \\ \omega_1 = U * \frac{PWM_1}{Period} * Kv, \\ \omega_2 = U * \frac{PWM_2}{Period} * Kv, \\ \omega_3 = U * \frac{PWM_3}{Period} * Kv, \\ \omega_4 = U * \frac{PWM_4}{Period} * Kv. \end{cases} \quad (8)$$

Модель (8) имеет шестой порядок по пространственным переменным при четырех управляющих входах, то есть является неполноприводной: число независимых управляющих воздействий меньше числа управляемых степеней свободы. Следовательно, управление по-

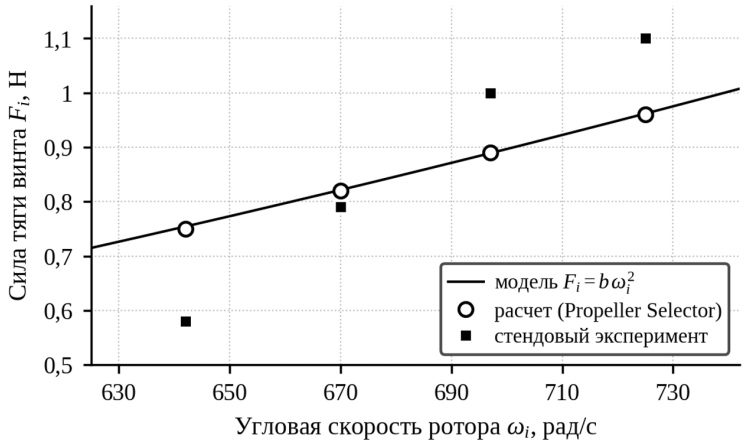


Рис. 2. Сопоставление расчетной и экспериментальной характеристик тяги винта

Таблица 1. Параметры имитационной модели БПЛА

Параметр	Обозн.	Значение	Единица
Масса аппарата	m	1,0	кг
Моменты инерции относительно *Ox, Oy, Oz*	I_x, I_y, I_z	0,00528; 0,00712; 0,00685	кг · м²
Расстояние до оси винта	L	0,25	м
Коэффициент тяги винта	b	$1{,}83 \cdot 10^{-6}$	Н · с²/рад²
Коэффициент реактивного момента	d	$4{,}94 \cdot 10^{-7}$	Н · м · с²/рад²
Диаметр винта	D	0,1524	м
Постоянная двигателя	K_v	2 400	об/(мин · В)
Напряжение батареи	U	11,1	В
Период ШИМ	T	5 000	дискр.

ложением в горизонтальной плоскости реализуемо только через контуры углового движения, что предопределяет каскадную структуру САУ.

Идентификация параметров модели

Достоверность полученной системы определяется входящими в нее параметрами, поэтому каждый из них определялся независимой процедурой.

Главные центральные моменты инерции вычислены по трехмерной модели аппарата в САПР *SolidWorks* с заданием фактических масс и материалов всех конструктивных элементов. Различие моментов инерции относительно осей *Ox* и *Oy* обусловлено несимметричным размещением батареи и определяет неодинаковое быстродействие каналов крена и тангажа.

Коэффициент тяги b зависит от геометрии винта и определялся расчетно-экспериментально. Расчетная характеристика получена в программе *Propeller Selector* для паспортных значений диаметра и шага винта при четырех частотах вращения ротора; осреднение по расчетным точкам дает $b = (1/4)\cdot\Sigma(F_i/\omega_i^2) = 1{,}83 \cdot 10^{-6}$ Н · с²/рад². Для проверки проведены стендовые измерения тяги одиночной винтомоторной группы при кодах скважности 1 150, 1 200, 1 250 и 1 300 дискрет, что согласно (2) соответствует угловым скоростям 642, 670, 697 и 725 рад/с. Сопоставление расчетной и экспериментальной характеристик приведено на рис. 2.

Усредненное по экспериментальным точкам значение коэффициента составляет

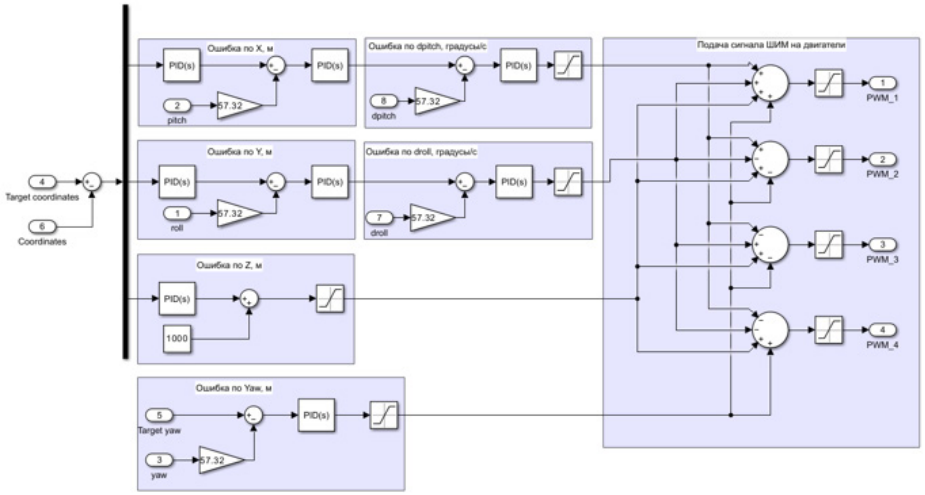


Рис. 3. Структура блока системы управления

$1{,}83 \cdot 10^{-6}$ Н·с²/рад² и совпадает с расчетным, что подтверждает корректность принятой величины b. Разброс отдельных точек относительно квадратичной характеристики достигает 23 % при среднем по модулю отклонении 13 % и носит систематический характер – занижение тяги в нижней части диапазона и завышение в верхней.

Коэффициент реактивного момента определен аналитически подстановкой в (6) значений $\rho = 1{,}225$ кг/м³, $C_d = 0{,}1$ и $D = 0{,}1524$ м, что дает $d \approx 4{,}94 \cdot 10^{-7}$ Н · м · с²/рад². Отношение $d/b \approx 0{,}27$ м показывает, что при равных плечах управляющая эффективность канала рыскания существенно ниже эффективности каналов крена и тангажа, что учитывается при выборе коэффициентов регуляторов. Сводные параметры модели приведены в табл. 1.

Параметры модели получены тремя независимыми методами – расчетом по трехмерной модели изделия, идентификацией с верификацией по стендовым измерениям и аналитически, что обеспечивает количественную адекватность модели реальному объекту.

Реализация и настройка системы управления в *MATLAB Simulink*

Модель реализована в виде трех блоков: объекта управления, воспроизводящего систему (7) в порядке «коды скважности – угловые скорости роторов – тяга и моменты – двукратное интегрирование ускорений»; системы управления, формирующей управляющие ШИМ-сигналы; блока целеуказания, в котором программные координаты преобразуются в связанную систему умножением на матрицу поворота вокруг вертикальной оси, что обеспечивает корректность отработки задания при ненулевом угле рыскания.

Структура блока системы управления (**СУ**) (рис. 3) каскадная, что вытекает из неполноприводности объекта. Внешний контур каждого канала формирует рассогласование по координате; для канала высоты выход ПИД-регулятора суммируется с сигналами всех четырех каналов управления, а для каналов продольного и бокового перемещения интерпретируется как задание на угол наклона корпуса, отрабатываемое внутренним контуром стабилизации угла и далее контуром угловой скорости. Это ограничивает угловое положение аппарата непосредственно в законе управления, исключая переворот при больших рассогласованиях. Выходы регуляторов суммируются с учетом знаков матрицы распределения (5), (6).

Настройка велась последовательно, от внутренних контуров к внешним, методом направленного перебора с оценкой качества по установившейся ошибке, перерегулированию и наличию автоколебаний [3; 7]. Результаты для канала высоты при $z^* = 5$ м приведены в табл. 2.

Только пропорциональный закон не обеспечивает выхода на заданный уровень: постоянное возмущение – сила тяжести – принципиально не компенсируется пропорциональным звеном при нулевой ошибке. Увеличение k_p

Таблица 2. Результаты параметрической настройки канала высоты

k_p	k_i	k_d	Характер переходного процесса
300	0	0	Заданная высота не достигается, устойчивые колебания
800	0	0	Выход на заданный уровень при статической ошибке и колебаниях
800	100	100	Амплитуда колебаний снижена, остаточная ошибка сохраняется
550	400	160	Апериодический выход на заданное значение, ошибка отсутствует

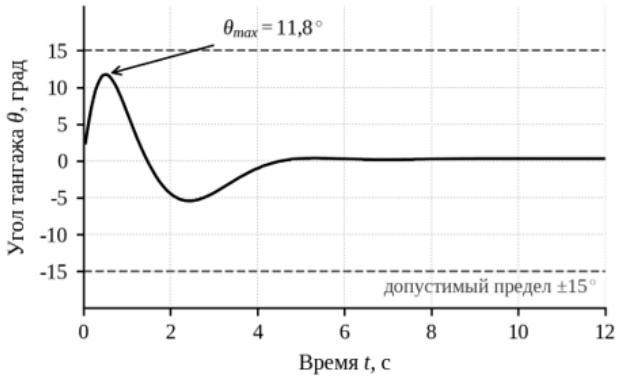


Рис. 4. Изменение угла тангажа при движении по координате x

сокращает статическую ошибку, но усиливает колебательность; ее демпфирует дифференциальная составляющая, а остаточную ошибку устраняет интегральная.

Для каналов горизонтального перемещения коэффициенты внешнего контура дополнительно ограничивались условием непревышения углами наклона значений, при которых вертикальная составляющая тяги становится недостаточной для компенсации силы тяжести.

Результаты

При задании $x^* = 4$ м угол тангажа достигает максимума 11,8° на 0,5 с при допустимом пределе 15°, что соответствует потере вертикальной составляющей тяги около 2 %, и к 4,1 с возвращается в окрестность нуля (рис. 4). Коэффициенты канала бокового перемещения близки к полученным для продольного; отличие обусловлено различием I_x и I_y.

Работоспособность САУ при одновременной отработке задания по всем каналам проверена вычислительным экспериментом с программным вектором $x^* = 4{,}0$ м, $y^* = 2{,}0$ м, $z^* = 3{,}0$ м (рис. 5). Все координаты выходят на заданные значения; время регулирования по пятипроцентному коридору составляет 4,0 с по каналу x, 2,8 с по каналу y и 6,6 с по каналу z, перерегулирование не превышает 2 %. Взаимное влияние каналов, обусловленное общей для них суммарной тягой, не приводит к потере устойчивости.

Каскадная структура регулирования обеспечила устойчивую отработку координатных заданий по всем трем каналам при отсутствии статической ошибки и непревышении углами наклона допустимых значений. Полученные наборы коэффициентов могут быть перенесены в программное обеспечение полетного контроллера в качестве начального приближения для настройки в натурном эксперименте.

Заключение

Построена математическая модель четырехроторного БПЛА, связывающая скважность управляющих ШИМ-сигналов с линейными и угловыми ускорениями аппарата и сохраняющая существенные нелинейности объекта. Все

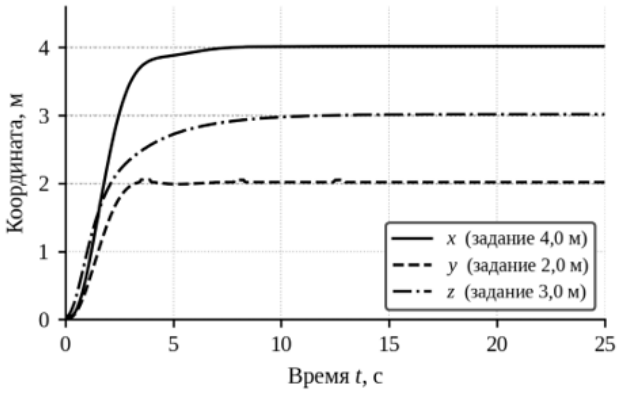


Рис. 5. Отработка произвольно заданных программных координат

параметры модели идентифицированы применительно к конкретной конструкции независимыми методами, включая верификацию коэффициента тяги по стендовым измерениям, что обеспечивает количественную адекватность модели.

В среде *MATLAB Simulink* синтезирована каскадная система автоматического управления, в которой контур позиционирования замкнут через контуры стабилизации углов и угловых скоростей; структура следует из неполноприводности объекта и ограничивает угловое положение непосредственно в законе управления.

Моделирование подтвердило отработку координатных заданий без статической ошибки при времени регулирования 2,8–6,6 с и перерегулировании не более 2 %, а также непревышение углом тангажа допустимого предела 15° (максимум 11,8°). Модель пригодна для отладки алгоритмов управления до этапа летных испытаний; дальнейшее развитие работы предполагает учет динамики электропривода и погрешностей инерциальных измерителей с проверкой синтезированных законов на опытном образце.

Список литературы

1. Белоконь, С.А. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории / С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев и др. // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 5. – С. 32–41.
2. Гурьянов, А.Е. Моделирование управления квадрокоптером / А.Е. Гурьянов // Инженерный вестник. – 2014. – № 8. – С. 522–534.
3. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.
4. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И.В. Мирошник. – СПб. : Питер, 2005. – 336 с.
5. Моисеев, В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В.С. Моисеев. – Казань : РЦМКО, 2013. – 768 с.
6. Рыбалкин, С.А. Разработка рамы БПЛА / С.А. Рыбалкин и др. – 2021.
7. Åström, K.J. Advanced PID Control / K.J. Åström, T. Hägglund. – Research Triangle Park : ISA, 2006. – 461 p.
8. Bouabdallah, S. Design and Control of Quadrotors with Application to Autonomous Flying : PhD thesis / S. Bouabdallah. – Lausanne : EPFL, 2007. – 155 p.
9. Luukkonen, T. Modelling and Control of Quadcopter / T. Luukkonen. – Espoo : Aalto University, 2011. – 26 p.
10. Mahony, R. Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor / R. Mahony, V. Kumar, P. Corke // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2012. – Vol. 19. – № 3. – P. 20–32.

References

1. Belokon', S.A. Upravleniye parametrami poleta kvadrokoptera pri dvizhenii po zadannoy trayektorii / S.A. Belokon', YU.N. Zolotukhin, A.S. Mal'tsev i dr. // Avtometriya. – 2012. – T. 48. – № 5. – S. 32–41.
2. Gur'yanov, A.Ye. Modelirovaniye upravleniya kvadrokopterom / A.Ye. Gur'yanov // Inzhenernyy vestnik. – 2014. – № 8. – S. 522–534.
3. Denisenko, V.V. PID-regulyatory: printsipy postroyeniya i modifikatsii / V.V. Denisenko // Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii. – 2006. – № 4. – S. 66–74.
4. Miroshnik, I.V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Lineynyye sistemy / I.V. Miroshnik. – SPb. : Piter, 2005. – 336 s.
5. Moiseyev, V.S. Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami / V.S. Moiseyev. – Kazan' : RTSMKO, 2013. – 768 s.
6. Rybalkin, S.A. Razrabotka ramy BPLA / S.A. Rybalkin i dr. – 2021.

© А.А. Зарукин, Д.А. Зинченко, Д.А. Третьяков, А.М. Борышнев, 2026

УДК 004.021

Д.А. ЗЫРЯНОВ, С.В. СОЛЕНЫЙ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» г. Санкт-Петербург

АЛГОРИТМ RSR ДЛЯ 8-МИ СВЯЗНЫХ ПРОСТРАНСТВ: МОДИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАРШРУТОВ

Ключевые слова: граф; динамические препятствия; поиск пути; построение маршрута; пространство поиска; сокращение симметрии; алгоритм *A-star;* алгоритм *RSR.*

Аннотация. Задача поиска пути в дискретизированном пространстве является одной из ключевых при навигации мобильных роботов и построении маршрутов на клеточных картах (например, получаемых методом *SLAM*). Наиболее распространенным решением остаются алгоритмы семейства *A**, эффективность которых зависит от представления пространства поиска. Одним из направлений их ускорения является модификация структуры графа – метод сокращения симметрии *RSR* (*Rectangular Symmetry Reduction*), исключающий из расчета узлы в областях без препятствий. Существующие реализации *RSR* ориентированы на 4-связные структуры, тогда как более быстрые 8-связные структуры остаются неохваченными, а известные подходы плохо обобщаются на прочие *n*-связные топологии (гексагональные, трехмерные), что определяет актуальность работы.

Целью работы является разработка модификации *RSR* для 8-связных пространств, масштабируемой на произвольные *n*-связные структуры. Задачи: построение корректной системы связей узлов периметра, разработка механизма удаления избыточных граничных узлов, формальное доказательство корректности модификаций, адаптация алгоритма к динамическим препятствиям, интеграция с *A**, оценка временной сложности и сравнительное моделирование скорости построения маршрута.

Гипотеза: перенос принципа сокращения симметрии на 8-связные пространства с удалением избыточных узлов сократит время расчета и объем хранимых данных при многократном использовании графа без потери оптимальности маршрута, причем предложенный принцип применим и к другим *n*-связным структурам.

Использованы методы формального доказательства, алгоритмическая модификация *RSR*, аналитическая оценка сложности, имитационное моделирование на *Python*.

Получена модификация *RSR* для 8-связных пространств, доказана корректность связей, показано существенное сокращение времени расчета и объема данных при многократном использовании графа, продемонстрирована применимость подхода к гексагональной сетке. Сформулированы рекомендации по выбору алгоритма в зависимости от задачи. Практическая значимость – применение в системах навигации робототехнических комплексов с *n*-связными клеточными картами.

Введение

Алгоритмы семейства *A**, к которым относятся *IDA**, *Theta**, *Phi** и другие, являются наиболее распространенными в задачах поиска пути в промышленной и игровой сферах [1–3]. В основе данных алгоритмов лежит эвристическая функция, выбираемая исходя из решаемой задачи. Чаще всего используется выражение:

$$f(p) = g(p) + w(p)h(p),$$

где $f(n)$ – оценочное значение, присвоенное вершине n; $g(n)$ – стоимость пути от стартовой точки до вершины n; $h(n)$ – эвристическая оценка стоимости пути от вершины n до конечной точки.

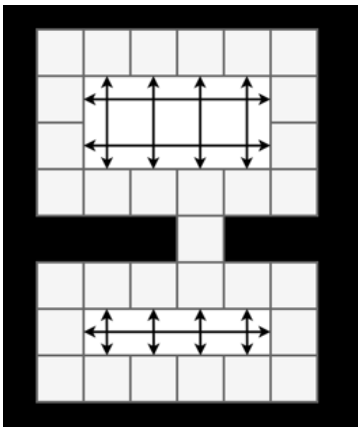


Рис. 1. Дополнительные ребра

Благодаря эвристике данные алгоритмы могут работать с различными типами представления пространства: клеточным, гексагональным, в виде графа.

Клеточные, гексагональные, треугольные и другие подобные варианты представления применяются в системах без заранее известных графов путей. Они позволяют упростить пространство поиска с помощью дискретизации. Примером может служить клеточная карта, полученная методом *SLAM*, применяемая при навигации роботов. При этом квадратная структура отличается наибольшей эффективностью среди прочих представлений [4].

В процессе расчета стандартный алгоритм *A** изучает клетки, соседствующие с лучшей по эвристике среди уже проверенных. Соседи могут выбираться по 4-связной системе (соседи слева, спереди, справа, сзади), а также по 8-связной (с добавлением четырех диагоналей). 8-связные структуры работают быстрее и эффективнее за счет сокращения количества проверяемых точек (вместо двух движений – одно). Однако при этом увеличивается количество ребер графа и потенциальных путей, что негативно влияет на потребляемую память и скорость расчета в случаях сложных маршрутов.

Для улучшения работы алгоритмов семейства *A** применяются два основных подхода [5]:

1. Улучшение самого алгоритма. Примерами являются алгоритмы *Phi**, *Theta**, *JPS* [6; 7].
2. Модификация пространства. За счет изменения принципа построения графа можно улучшить скорость работы алгоритмов без их изменения, что важно в задачах, где эвристика и порядок расчета фиксированы и не могут быть изменены.

Одной из модификаций пространства является метод сокращения симметрии прямоугольных областей (в иностранной литературе *Rectangular Symmetry Reduction* – ***RSR***) [3; 5].

Целью данного алгоритма является упрощение пространства поиска маршрута за счет удаления пустых пространств. Под пустым пространством понимается область, в которой отсутствуют препятствия для перемещения.

За счет игнорирования части областей удается сократить общее время поиска пути. Однако это накладывает дополнительные требования по предобработке пространства, что описано далее.

Стандартный алгоритм *RSR* предполагает применение с 4-связной клеточной структурой и выглядит следующим образом.

1. Разбить сетку на прямоугольники без препятствий.
2. Удалить все узлы внутри прямоугольников, оставив только узлы по периметру.
3. Добавить ребра между противолежащими узлами по периметру (рис. 1).
4. Для начального и конечного узлов пути создать внутри пустой области дополнительные клетки, соединяемые по правилам п. 3 с периметром.

Большинство современных реализаций *RSR* ориентированы на топологию с четырьмя соседями. Хотя существуют алгоритмы для 8-связных сеток, их логика построения маршрутов плохо поддается обобщению на многомерные или неквадратные среды. При этом, как было отмечено ранее, учет восьми соседей существенно повышает вычислительную эф-

фективность. В связи с этим актуальной задачей становится создание модификации *RSR* для 8-связных топологий, которую можно было бы легко масштабировать на *n*-мерные и нестандартные структуры (например, гексагональные или трехмерные).

Цель работы – разработка модификации алгоритма *RSR* для 8-связных пространств, включающей построение корректной системы связей между узлами периметра пустых областей, дополнительный механизм сокращения избыточных узлов, а также оценку эффективности полученного алгоритма при интеграции с семейством алгоритмов *A**, в том числе в условиях динамически возникающих препятствий.

Решение

Для работы алгоритма введем понятие объекта пустой области. Данный объект должен хранить информацию о точках, находящихся на границе, а также информацию о самой области (координаты углов) – это необходимо для привязки начальных и конечных точек. Основная сложность предлагаемой модификации состоит в том, что для каждой клетки периметра создается не одно соединение, а несколько. Один из вариантов построения соединений предложен в работе «*Path Symmetries in Undirected Uniform-Cost Grids*» [8]. В общем случае каждая ячейка соединяется со всеми другими ячейками по периметру, кроме тех, с которыми она лежит на одной стороне области.

Алгоритм аналогичен алгоритму для 4-связной сетки за исключением этапа добавления ребер. При формировании пустой области необходимо хранить все точки периметра в едином множестве. Затем для каждой точки добавляется ребро к другим точкам периметра, за исключением тех, с которыми она лежит на одной стороне. Таким образом, каждая клетка периметра оказывается связанной с остальными клетками периметра, что гарантирует быстрое нахождение оптимального пути.

Доказательство утверждения о связности. Обозначим:

– E – множество точек периметра пустой области;
– S_1, S_2, S_3, S_4 – стороны периметра;
– $p_i \in E$ – произвольная точка периметра.

Каждая точка p_i связана с точками множества $E \setminus S_i$, где S_i – сторона, на которой лежит p_i. Кроме того, p_i связана с двумя соседними точками на той же стороне S_i.

Так как точки на каждой стороне S_i попарно соединены, между любыми двумя точками $p_1, p_2 \in E$ существует последовательность связей. Следовательно, E является связным множеством, т.е. $\forall p_1, p_2 \in E$, существует прямой путь между p_1 и p_2 в графе.

Введем дополнительную модификацию алгоритма *RSR* – удаление граничных точек пустых пространств, не имеющих других соединений, кроме связей внутри собственной пустой области. Такие точки являются избыточными в задаче поиска пути, так как соединены только с точками той же пустой области и никак не продвигают расчет пути. Удаление таких точек не влияет на результат построения маршрута, однако ускоряет процесс вычислений за счет уменьшения числа проверяемых точек.

Доказательство утверждения об избыточности. По алгоритму для начальной и конечной точек пути внутри пустых пространств создаются дополнительные клетки, соединяющиеся с клетками периметра. Рассмотрим случаи.

1. Если начальная и конечная точки находятся внутри одной пустой области или на ее периметре, они соединяются напрямую.
2. Если начальная и конечная точки находятся не в одной пустой области, формируется последовательность точек $P = \{p_1, p_2, \dots pn\}$, такая, что $\forall p_1 \in: C(p_i) \neq C(p_i + 1)$, где $C(p)$ – множество соединений каждой последовательной пары точек p.

Точки могут принадлежать нескольким пустым областям одновременно или соединяться с точками, не принадлежащими пустым областям. В этом случае множество соединений таких точек является объединением точек периметра всех смежных областей и прочих связанных точек.

Тогда для $\forall p_1, p_2 \in E$, принадлежащих периметру одной пустой области и не связанных с другими точками или областями, справедливо $C(p_1) = C(p_2)$, а значит, такие точки могут быть исключены из расчета пути без потери оптимальности маршрута.

Модифицированный алгоритм следующий.

1. Разбить сетку на прямоугольники без препятствий.
2. Удалить все узлы внутри прямоугольников, оставив только узлы по периметру (записать их в множество).
3. Удалить узлы, связанные только с одной пустой областью.

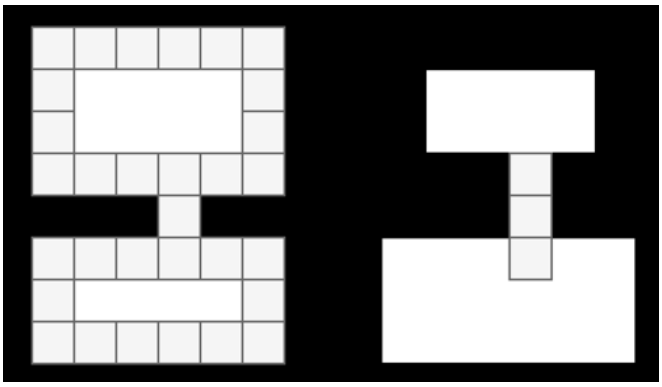


Рис. 2. Сокращение точек, связанных только с одной пустой областью

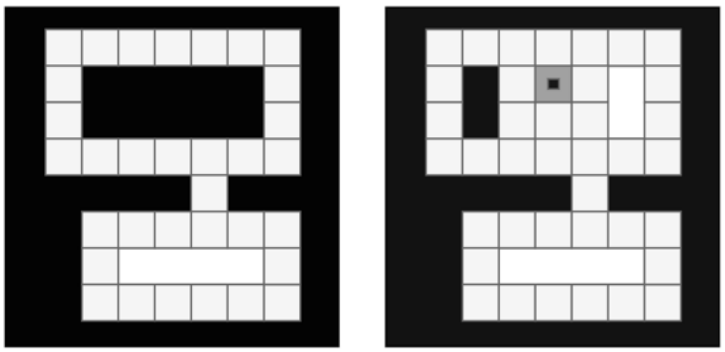


Рис. 3. Разбиение области при возникновении в ней препятствия

4. Добавить ребра между оставшимися узлами по периметру.

5. Для начального и конечного узлов пути создать внутри пустой области дополнительные клетки, соединяемые с узлами периметра.

Таким образом, в графе остаются только граничные точки и точки перехода между областями. Благодаря этому алгоритмы семейства *A** могут работать со скоростью, сопоставимой с алгоритмом *JPS* [5], сохраняя при этом свойство оптимальности построенных маршрутов.

Рассмотрим случай, когда алгоритм *RSR* применяется в условиях динамических препятствий. При обнаружении препятствия возможны два случая:

1) если препятствие находится в обычном (не пустом) пространстве, соответствующие точки удаляются и не участвуют в расчетах;

2) если препятствие находится внутри пустой области, необходимо разбить область на отдельные подобласти (рис. 3).

Рассмотрим интеграцию данного алгоритма с *A**. Для привязки начальных и конечных точек проверяются ближайшие соседние точки. Поскольку часть точек была удалена на этапе упрощения пространства, необходимо проверять, попадает ли рассматриваемая точка в пустое пространство (либо соседствует с ним – для случая расположения на краю построенной карты). Если точка принадлежит пустой области, в список потенциальных точек добавляются все граничные точки этой области. Поскольку точки проверяются по эвристике, а все точки внутри области являются связанными, с высокой вероятностью первая выбранная точка окажется единственной проверенной из всей пустой области. В остальном алгоритм остается без изменений.

1. Создаются два набора точек: исследованные и потенциальные.

2. Из потенциальных точек выбирается лучшая по эвристике (реализуется, например, с помощью кучи с удалением произвольных элементов).

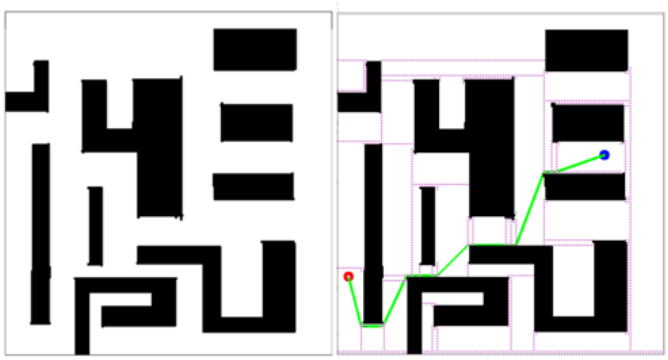


Рис. 4. Пример построения графа

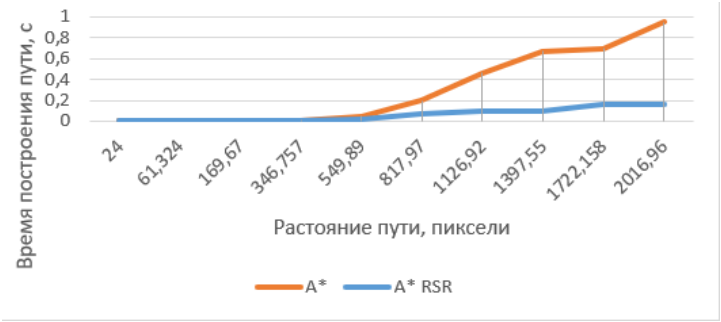


Рис. 5. Время просчета маршрута для *A** и *A** с *RSR*

3. В список потенциальных добавляются точки, связанные с изучаемой.

4. Потенциальная точка переносится в список исследованных.

5. Алгоритм повторяется, пока не будет найдена точка финиша (или связанная с ней).

Результаты расчетов и моделирования

Временная сложность описанного алгоритма *RSR* составляет $O(V)$, где V – количество точек графа. При этом алгоритму требуется выполнить три прохода по точкам:

1) для определения пустых областей;
2) для создания связей (ребер);
3) для удаления узлов, связанных только с одной пустой областью.

При этом линейное время построения графа *RSR* многократно окупается ростом скорости работы поисковых алгоритмов.

Пример работы алгоритма представлен на рис. 4. Стоит отметить, что из-за того, что в пустых областях маршрут строится непосредственным соединением точек, путь может получиться короче, чем в случае без использования алгоритма *RSR*.

Графики расчета времени работы алгоритма с *RSR* и без него для различных областей приведены на рис. 5 и 6. Расчеты производились на языке программирования *Python*. Точки для просчета выбирались случайным образом с целью проверки построения маршрута в различных ситуациях (движение по прямой, обход препятствий). Приведенные графики отражают лишь общую тенденцию роста времени расчета маршрута.

Графики показывают существенный разрыв в скорости расчета маршрута с увеличением дистанции. Рост времени расчета для *A** является практически равномерным, тогда как для *RSR* за счет удаления пустых областей рост времени просчета с увеличением дистанции иногда практически отсутствует. Общая тенденция роста времени у *RSR* значительно ниже, чем у базового алгоритма.

Сравним алгоритм *RSR* с системой без *RSR* и в условиях динамического перестроения маршрутов (табл. 1). Параметры системы без алгоритма *RSR* зависят от выбранного алгоритма построения маршрута (варианты *A**, *JPS*, ал-

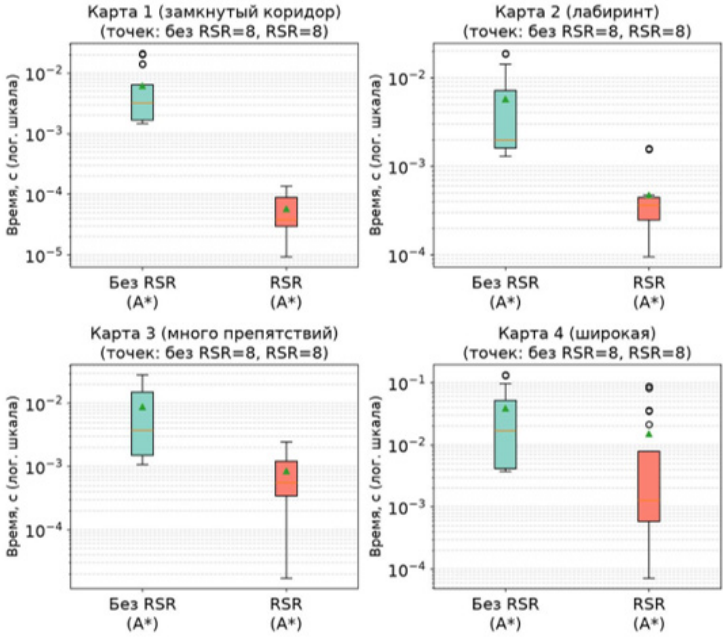


Рис. 6. Время просчета маршрута для *A** и *A** с *RSR* на различных картах

Таблица 1. Сравнение вариаций алгоритмов

Критерий	Без *RSR*	С *RSR*	С *RSR* при динамическом перестроении
Время 1 расчета	T_1	$T(V) + T_1 - TRSR$, где $T(V) > TRSR$, т.е. $T(V) + T_1 - TRSR > T_1$	$T(V) + T_1 - TRSR$, где $T(V) > TRSR$, т.е. $T(V) + T_1 - TRSR > T_1$
Время n расчетов	nT_1	$T(V) + n(T_1 - TRSR)$	$T(V) + n(T_1 - TRSR)$
Потребление памяти	M_1	$M_1 + M(V)$	$M_1 + M(V)$
Сложность внедрения	Низкая	Требует интеграции с алгоритмом построения маршрута и подбора системы хранения данных	Дополнительно требует оптимизации пересчетов при динамическом перестроении
Количество точек маршрута	Зависит от шага сетки	Зависит от шага сетки и количества пустых пространств (чем их больше, тем меньше точек)	Зависит от шага сетки и количества пустых пространств

горитм Дейкстры, поиск в ширину и др.):

– T_1 – время расчета алгоритма построения маршрута;

– T_{RSR} – время выигрыша при использовании *RSR*;

– M_1 – потребление памяти алгоритмом построения маршрута;

– $T(V)$ – время расчета алгоритма *RSR* (зависимость от количества вершин графа);

– $M(V)$ – потребление памяти *RSR* (зависимость от количества вершин графа);

– n – количество просчетов маршрута.

На основании приведенного сравнения можно сформулировать следующие рекомендации по выбору алгоритма в зависимости от условий применения.

1. При однократных просчетах маршрута целесообразно применять построение без *RSR*, так как выигрыш от *RSR* будет меньше времени, затрачиваемого на построение самого графа *RSR*.

2. При многократных расчетах без изме-

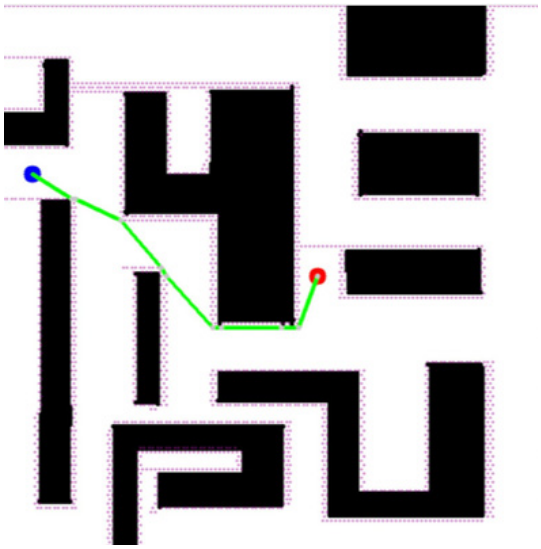


Рис. 7. Гексагональная сетка

нения графа целесообразно применять построение с *RSR*: при увеличении числа расчетов выигрыш во времени растет пропорционально.

3. При динамических просчетах целесообразно применять построение без *RSR* либо выполнять локальный пересчет *RSR* – как и в случае однократных просчетов, выигрыш может быть нивелирован затратами на пересчет самого *RSR*.

Продемонстрируем также применение данного алгоритма для гексагональных сеток (рис. 7). Данный алгоритм легко переносится на различные *n*-связные структуры, что позволяет его использовать в различных обстоятельствах для упрощения пространства поиска.

Во всех случаях количество пустых пространств зависит не только от структуры графа, но и от шага сетки, поэтому качество маршрутов может быть повышено за счет уменьшения шага сетки (с соответствующим увеличением числа пустых пространств).

Выводы

Алгоритм *RSR* позволяет значительно сократить область поиска при построении маршрута. Внедрение дополнительного сокращения точек пространства, связанных только с одной пустой областью, также существенно увеличивает скорость расчета маршрутов. Таким образом, вычислительные ресурсы, затраченные на оптимизацию графа, окупаются при частом построении маршрутов на неизменном графе.

Преимущества алгоритма:

1) сокращает объем данных, необходимых для хранения пространства;

2) сокращает время построения маршрута;

3) делает маршруты более плавными за счет концентрации на точках перехода.

Особенности и ограничения:

1) при динамическом построении карты (когда *A** строит карту непосредственно во время расчета пути) применение *RSR* потребует дополнительного объема памяти для хранения области;

2) требуется дополнительный этап предварительных расчетов, который может занимать значительное время;

3) в условиях динамического обнаружения препятствий требуются дополнительные расчеты вследствие постоянного пересчета областей;

4) если пересчет препятствий затрагивает большую часть графа *V*, применение *RSR* становится нецелесообразным.

Алгоритм может использоваться и в условиях динамического появления препятствий, однако в этом случае необходимо соотносить частоту пересчета графа с частотой построения маршрутов, а также учитывать размер области пересчета. На основании данного соотношения принимается решение о целесообразности применения алгоритма *RSR*.

Список литературы

1. Aremu, M.B. Autonomous Mobile Robot Path Planning Techniques – A Review: Classical and Heuristic Techniques / M.B. Aremu, I.K. Kabir, G. Ahmed, S. El-Ferik // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 117999–118022.

2. Han, S. A Dynamically Hybrid Path Planning for Unmanned Surface Vehicles Based on Non-Uniform Theta* and Improved Dynamic Windows Approach / S. Han, L. Wang, Y. Wang, H. He // Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 257. – Art. 111655. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111655.

3. Banik, S. Path Planning Approaches in Multi-Robot System: A Review / S. Banik, S.Ch. Banik, S.S. Mahmud // Engineering Reports. – 2024.

4. Басараб, М.А. Алгоритмы решения задачи быстрого поиска пути на географических картах / М.А. Басараб, А.Б. Домрачева, В.М. Купляков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 11(23). – С. 21.

5. Duchoň, F. Path Planning with Modified A Star Algorithm for a Mobile Robot / F. Duchoň, A. Babinec, M. Kajan, P. Beňo, M. Florek, T. Fico, L. Jurišica // Procedia Engineering. – 2014. – No. 96. – P. 59–69.

6. Guo, R. Path Planning for Mobile Robots Based on a Hybrid-Improved JPS and DWA Algorithm / R. Guo, X. Ren, Ch. Bao // Electronics. – 2025. – Vol. 14. – № 16. – Art. 3221.

7. Carlson, M. Optimal Pathfinding on Weighted Grid Maps / M. Carlson, S.K. Moghadam, D.D. Harabor [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 37. – No. 10. – P. 12373–12380.

8. Harabor, D. Path Symmetries in Undirected Uniform-Cost Grids / D. Harabor, A. Botea, P. Kilby // SARA 2011 – Proceedings of the 9th Symposium on Abstraction, Reformulation, and Approximation. – 2011. – P. 58–61.

References

4. Basarab, M.A. Algoritmy resheniya zadachi bystrogo poiska puti na geograficheskikh kartakh / M.A. Basarab, A.B. Domracheva, V.M. Kuplyakov // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. – 2013. – № 11(23). – S. 21.

© Д.А. Зырянов, С.В. Соленый, 2026

УДК 658.512.

А.С. ВОРОБЬЕВ, С.А. ЛЮБОМУДРОВ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» г. Санкт-Петербург

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: критерий оценки; мелкосерийное производство; металлообработка; образец изделия; опытное производство; техническая подготовка производства; эффективность подготовки производства.

Аннотация. В работе представлены результаты применения методики оценки технической подготовки производства новых изделий в условиях опытного и мелкосерийного производства. Цель заключалась в проверке возможности использования комплексного показателя готовности производства для обоснованного принятия решений о запуске новой продукции в производство. Для достижения поставленной цели были определены задачи: проанализировать результаты деятельности сборочно-сварочного производства АО «Кронштадтский морской завод» за период 2019–2025 гг.; выполнить сопоставление показателей изготовления серийной продукции и новых изделий; оценить техническую готовность производства; определить направления ее совершенствования. В качестве гипотезы предполагалось, что использование комплексного показателя готовности позволит более точно выявлять недостатки конструкторской и технологической подготовки до начала выпуска изделий в оборот. В работе использованы методы анализа деятельности производства, сравнительной оценки технико-экономических показателей, статистической обработки данных, а также расчет коэффициентов производительности, трудоемкости, материалоемкости, себестоимости и комплексного показателя готовности производства. В результате установлено, что предложенный подход обеспечивает количественную оценку уровня готовности производства к освоению новых изделий, позволяет своевременно выявлять необходимость корректировки конструкции или технологического процесса и обосновывать переход к серийному производству. Практическая апробация на базе действующего предприятия подтвердила применимость методики для повышения эффективности технической подготовки производства.

Введение

Проектирование и организация металлообрабатывающих участков, цехов, производств малых предприятий требуют моделирования технологических и производственных процессов [3; 8; 9]. Однако особенности единичного и мелкосерийного позаказного производства существенно осложняют решение данной задачи [10]. Это связано с разнообразием выпускаемой продукции, изменчивостью условий производства и частой корректировкой технологических процессов. С учетом указанных особенностей построенная модель будет иметь высокий уровень абстракции и низкий уровень достоверности результатов моделирования [6].

Актуальной остается проблема технической подготовки и моделирования производства подобных предприятий, особенно производства новых изделий при сохранении существующего объема выпускаемой продукции (услуг). При переходе на выпуск нового изделия одной из основных задач является минимизация финансовых потерь, которые связаны с вынужденным простоем производства [4]. Вопросы оценки эффективности технической подготовки таких производств недостаточно освещены в литературе.

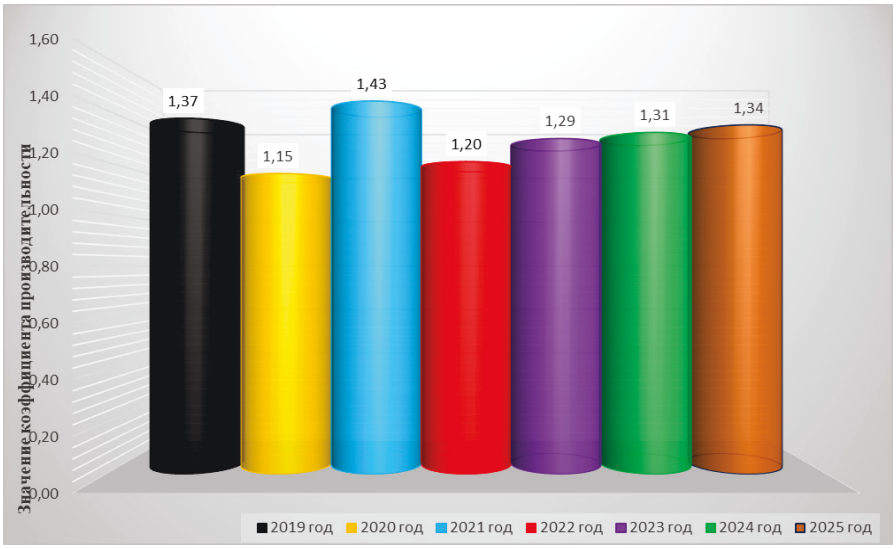


Рис. 1. Изменение среднемесячного коэффициента производительности по годам за период 2019–2025 гг.

Описание метода исследования

Исследование выполнено на территории АО «Кронштадтский морской завод» на базе сборочно-сварочного производства. Рассматриваемое производство создано на территории предприятия в 2018 г. [2]. Оно относится к позаказному типу и, согласно ГОСТ 14.004-83, является единичным. Коэффициент закрепления операций превышает 25. Подразделение выполняет механообрабатывающие и сборочно-сварочные работы при судоремонте и строительстве судов. Наряду с этим осуществляется изготовление новых изделий (механическая обработка, сварка, сборка, испытания и окраска).

Цель исследования – анализ результатов применения методики оценки технической подготовки производства в условиях мелкосерийного и опытного производства с целью повышения ее эффективности.

Задачи исследования:

– изучить выполненные работы подразделения за период с августа 2019 г. по декабрь 2025 г.;

– оценить и сравнить показатели эффективности производственного подразделения в целом, а также его эффективность при изготовлении новых образцов изделий;

– проанализировать эффективность технической подготовки производства новых образцов изделий по разработанной методике;

– внести изменения в систему технической подготовки производства действующего и проектируемого предприятия на основе полученных результатов.

Объектами исследования на АО «Кронштадтский морской завод» выбраны следующие новые изделия: понтон, кабина санитарная каютная, стол-мойка с тремя раковинами, шкафларь, дверь огнезадерживающая класса В-15, трап водолазный и фундамент под установку комплекса противовоздушной обороны (**ПВО**).

Эффективность производства оценивали ежемесячно по коэффициенту производительности (**Кпр**), который определяли как отношение выполненной трудоемкости к фонду рабочего времени (Кпр = Тр/Фв).

Также проводилась оценка количества изготовленных новых образцов изделий и результативности работы производственного подразделения при их изготовлении.

Техническую подготовку производства считали завершенной после разработки конструкторской и технологической документации, подготовки средств технологического оснащения и выполнения мероприятий, предусмотренных при постановке изделия на производство [5].

Эффективность подготовки оценивали по коэффициенту освоения плановой производительности труда (**Кп**), коэффициенту трудоемкости (**Кт**), коэффициенту материалоемкости (**Км**) и коэффициенту себестоимости (**Кс**) [1].

Коэффициенты Кп, Кт, Км и Кс рассчитывали по фактическим и плановым значениям

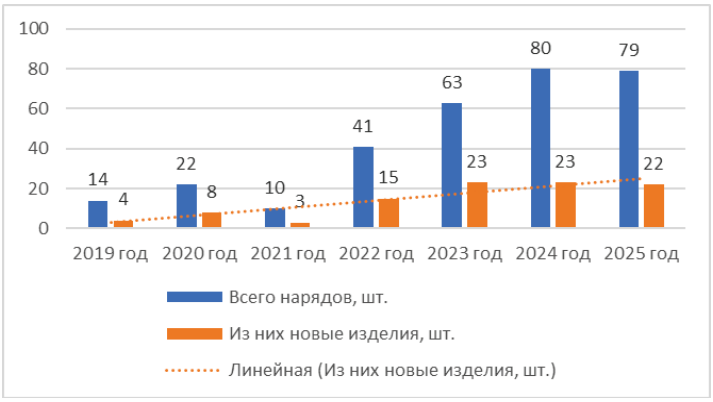


Рис. 2. График, отражающий изменение количества выполняемых работ за период 2019–2025 гг., в том числе производство новых изделий

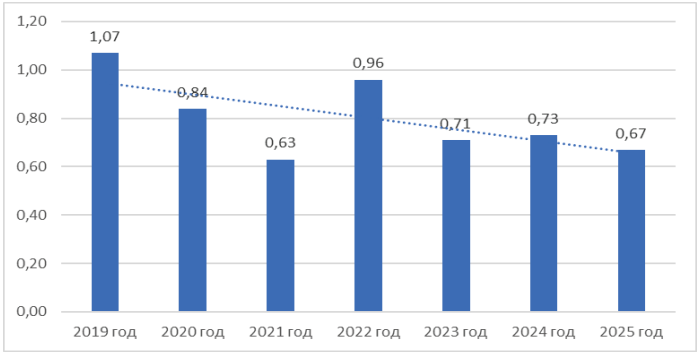


Рис. 3. График, отражающий изменение показателей эффективности работы производственного подразделения при изготовлении новых образцов изделий за период 2019–2025 гг.

соответствующих показателей [7].

Помимо вышеуказанных критериев, при необходимости предлагалось вводить дополнительные критерии оценки, учитывающие качество конструкторской документации, удовлетворенность заказчика и другие показатели, необходимые для оценки технической подготовки производства.

На основании указанных критериев разработан метод оценки эффективности технической подготовки производства. Комплексный показатель готовности производства (**Кгот**) предложено рассчитывать как среднее арифметическое используемых коэффициентов:

$$Кгот = (Кп + Кт + Км + Кс + \ldots + К\textit{n})/\textit{n},$$

где К*n* – дополнительный показатель; *n* – число используемых показателей.

Также было рекомендовано ввести нижнюю границу комплексного показателя готовности производства Кгот, например, 0,75. При Кгот ≤ 0,75 выполненную техническую подготовку производства считать неэффективной, изделие в производство не запускать и отправлять на доработку.

Результаты исследования

Средний коэффициент производительности производственного подразделения за период 2019–2025 гг. представлен на рис. 1.

Количество изготовленных новых образцов изделий и показатели эффективности работы производственного подразделения при изготовлении новых образцов изделий показаны на рис. 2, 3.

Из рис. 2 и 3 видно, что за период 2019–2025 гг. увеличились объем выполненных работ и количество изготовленных новых изделий. При этом коэффициент производительности

Таблица 1. Показатели и заключение по изделиям, выбранным для анализа эффективности

№ пп	Наименование изделия	Показатель					Заключение
		Кт	Км	Кс	Ку	Кгот	
1	Понтон	1,01	1,02	0,78	0,10	0,73	Переработать конструкцию изделия для улучшения эксплуатационных возможностей
2	Кабина санитарная каютная	0,25	1,14	0,42	1,00	0,70	Отправить на повторную подготовку производства, переработать технологический процесс изготовления
3	Стол-мойка с тремя раковинами	0,46	0,88	0,53	1,00	0,52	Отправить на повторную подготовку производства, переработать технологический процесс изготовления
4	Шкаф-ларь	0,69	0,69	0,75	1,00	0,78	Внести изменения в технологический процесс изготовления (оптимизировать)
5	Дверь огнезадерживающая класса В-15	0,91	1,15	0,97	0,90	0,98	Оптимизировать производственный процесс
6	Трап водолазный	1,20	1,22	1,21	1,00	1,16	Допустить до серийного изготовления
7	Фундамент под установку комплекса ПВО	1,19	1,13	1,00	1,00	1,08	Допустить до серийного изготовления

при изготовлении новых изделий снизился и оставался существенно ниже, чем при выполнении типовых работ.

Для анализа эффективности технической подготовки производства по каждому из рассматриваемых изделий (понтон, санитарная каютная кабина, стол-мойка с тремя раковинами, шкаф-ларь, дверь класса В-15, водолазный трап и фундамент под установку комплекса ПВО) на АО «Кронштадтский морской завод» были рассчитаны коэффициенты Кт, Км, Кс, Ку и комплексный показатель Кгот. В табл. 1 представлены результаты.

Из табл. 1 видно, что значение Кгот выше 0,75 получено для двери огнезадерживающей класса В-15, водолазного трапа и фундамента под установку комплекса ПВО. Для остальных изделий потребовалась доработка конструкции или технологического процесса.

Заключение

На примере действующего сборочно-сварочного производства АО «Кронштадтский морской завод» проведено исследование выполненных работ подразделения за период с августа 2019 г. по декабрь 2025 г.

Анализ показателей эффективности производственного подразделения в целом, а также его эффективности при изготовлении новых образцов изделий показал, что средний коэффициент производительности при выполнении типовых работ составляет 1,30, а при производстве новых образцов изделий – только 0,80. Разработанная методика применена при оценке готовности производства к выпуску новой продукции в условиях мелкосерийного и опытного производства. Это позволяет своевременно выявить недостатки технической подготовки производства и устранить их до начала изготовления изделий.

Методика может повысить эффективность вновь проектируемого сборочно-сварочного производства, имеющего организационную и технологическую преемственность.

С целью сокращения финансовых затрат оценку эффективности технической подготовки производства необходимо делать до запуска в производство опытного образца (установочной партии) изделий.

Список литературы

1. Амиров, Ю.Д. Научно-техническая подготовка производства / Ю.Д. Амиров. – М. : Изд-во «Экономика», 1989.
2. Воробьев, А.С. Анализ опыта организации сборочно-сварочного производства на базе совместного российско-норвежского предприятия / А.С. Воробьев, С.А. Любомудров // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : сборник статей / под ред. А.А. Поповича, Д.П. Гасюка ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2024.
3. Воробьев, А.С. Анализ технического задания на проектирование и создание авиадвигателестроительного предприятия / А.С. Воробьев, С.А. Любомудров // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : сборник статей / под ред. А.А. Поповича, Д.П. Гасюка ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2023.
4. Губайдулина, Р.Х. Организация перехода на производство нового изделия / Р.Х. Губайдулина, С.И. Петрушин // Организатор производства. – 2015. – № 1(64).
5. Гамрат-Курек, Л.И. Эффективность технической подготовки производства / Л.И. Гамрат-Курек, А.С. Магиденко. – М. : Изд-во «Экономика», 1979.
6. Григорьев, С.Н. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С.Н. Григорьев, В.А. Долгов, П.А. Никишечкин и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2022. – № 3(142).
7. Гордеев, А.С. Построение многофакторной модели технологической подготовки производства промышленных предприятий в условиях дискретно-нестабильных программ выпуска / А.С. Гордеев // Вестник экономики транспорта и промышленности. – 2015. – № 52.
8. Жаров, М.В. Исследование перспектив применения программных средств имитационного моделирования при разработке и оптимизации производств машиностроения / М.В. Жаров // Вестник Пермского университета. – 2021. – Вып. 3(54).
9. Ревина, И.В. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей / И.В. Ревина, Г.Н. Бояркин // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162).
10. Хрусталева, И.Н. Имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки / И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров // Научно-технические ведомости СПбПУ. Серия «Естественные и инженерные науки». – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – Т. 23. – № 2.

References

1. Amirov, YU.D. Nauchno-tekhnicheskaya podgotovka proizvodstva / YU.D. Amirov. – M. : Izd-vo «Ekonomika», 1989.
2. Vorob'yev, A.S. Analiz opyta organizatsii sborochno-svarochnogo proizvodstva na baze sovmestnogo rossiysko-norvezhskogo predpriyatiya / A.S. Vorob'yev, S.A. Lyubomudrov // Modeli i metody razvitiya tekhnologiy mashinostroyeniya v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki Rossii : sbornik statey / pod red. A.A. Popovicha, D.P. Gasyuka ; Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo. – Sankt-Peterburg, 2024.
3. Vorob'yev, A.S. Analiz tekhnicheskogo zadaniya na proyektirovaniye i sozdaniye aviadvigatelestroitel'nogo predpriyatiya / A.S. Vorob'yev, S.A. Lyubomudrov // Modeli i metody razvitiya tekhnologiy mashinostroyeniya v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki Rossii : sbornik statey / pod red. A.A. Popovicha, D.P. Gasyuka ; Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo. – Sankt-Peterburg, 2023.
4. Gubaydulina, R.KH. Organizatsiya perekhoda na proizvodstvo novogo izdeliya / R.KH. Gubaydulina, S.I. Petrushin // Organizator proizvodstva. – 2015. – № 1(64).
5. Gamrat-Kurek, L.I. Effektivnost' tekhnicheskoy podgotovki proizvodstva / L.I. Gamrat-Kurek, A.S. Magidenko. – M. : Izd-vo «Ekonomika», 1979.
6. Grigor'yev, S.N. Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh protsessov razlichnykh

tipov mashinostroitel'nykh proizvodstv / S.N. Grigor'yev, V.A. Dolgov, P.A. Nikishechkin i dr. // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroyeniye». – 2022. – № 3(142).

7. Gordeyev, A.S. Postroyeniye mnogofaktornoy modeli tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh diskretno-nestabil'nykh programm vypuska / A.S. Gordeyev // Vestnik ekonomiki transporta i promyshlennosti. – 2015. – № 52.

8. Zharov, M.V. Issledovaniye perspektiv primeneniya programmnykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya pri razrabotke i optimizatsii proizvodstv mashinostroyeniya / M.V. Zharov // Vestnik Permskogo universiteta. – 2021. – Vyp. 3(54).

9. Revina, I.V. Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennogo protsessa izgotovleniya detaley / I.V. Revina, G.N. Boyarkin // Omskiy nauchnyy vestnik. – 2018. – № 6(162).

10. Khrustaleva, I.N. Imitatsionnaya model' tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva tsekha mekhanicheskoy obrabotki / I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrov // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Seriya «Yestestvennyye i inzhenernyye nauki». – Sankt-Peterburg : Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo, 2017. – T. 23. – № 2.

© А.С. Воробьев, С.А. Любомудров, 2026

УДК 621.9.01:629.78

И.Ю. ЛИМОЧКО, И.И. СОЛОВЬЕВ, И.В. ТРИФАНОВ
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» г. Красноярск

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Ключевые слова: деформация детали; механическая обработка; ракетно-космические изделия; технологическая наследственность; технологическая подготовка; тонкостенная деталь; точность обработки; цифровое моделирование.

Аннотация. Цель исследования – разработать порядок построения технологического процесса обработки тонкостенных корпусных деталей с формализованным выбором процесса-аналога. Задачи исследования: 1) обосновать признаки выбора процесса-аналога; 2) определить правила повторного применения технологических модулей; 3) связать построение маршрута с расчетом промежуточной жесткости и деформации; 4) сравнить исходный и предлагаемый процессы.

Гипотеза исследования: оценка сходства деталей по нормированным конструкторско-технологическим признакам, пересчет припусков и параметров закрепления, а также анализ упругих перемещений до выпуска управляющей программы позволяют снизить трудоемкость технологической подготовки и формоизменение детали.

Методы исследования: конструкторско-технологическая классификация, размерный анализ, вариантное проектирование, метод конечных элементов и расчетное сравнение маршрутов.

Достигнутые результаты: трудоемкость проектирования снижена на 35,5 %, число установов – на 33,3 %, машинное время – на 16,9 %, наибольшее отклонение формы – с 0,39 до 0,22 мм (на 43,6 %). Гипотеза подтверждена в пределах вычислительного эксперимента; для окончательной проверки требуется производственная апробация.

Введение

В технологической подготовке ракетно-космических изделий наиболее трудной остается разработка процессов для корпусных, панельных и рамных деталей малой жесткости. После чернового фрезерования их форма меняется не только под действием силы резания. Существенную роль играют закрепление заготовки, исходные остаточные напряжения и последовательность удаления материала. Поэтому деталь, удовлетворяющая требованиям в закрепленном состоянии, после снятия с приспособления может выйти за установленный допуск. Проверка маршрута должна учитывать эту стадию, иначе значительная часть корректировок переносится непосредственно в цех.

Рассматриваемая задача относится к проектированию технологических процессов механической обработки. В центре внимания находятся выбор технологических баз, построение установов, распределение припуска и прогноз точности промежуточных форм детали. Производственные условия учитываются через доступный состав оборудования, оснастки и средств контроля. Такая постановка соответствует специальности 2.5.6 «Технология машиностроения».

Для предприятий Красноярского края задача имеет практическое значение: ракетно-космические изделия выпускаются единично либо малыми партиями, а подготовка новой детали по длительности сопоставима с изготовлением первых экземпляров. Механический перенос маршрута от внешне похожего изделия ненадежен. Различия в толщине стенок, расположении ребер, состоянии заготовки и допусках

меняют жесткость, устойчивость базирования и характер деформации после снятия основного припуска.

Машинное время отражает только загрузку оборудования и не показывает устойчивость попадания детали в поле допуска. При единичном выпуске брак одного экземпляра способен сорвать всю программу. Поэтому перенос технологии требует анализа причин достижения точности, а не только сопоставления чертежей [10].

Б.М. Базров связывает устойчивость технологического решения с согласованием вида обработки и свойств изделия [1]. В работах В.Ф. Безъязычного и Е.В. Растегаева показана результативность ранней совместной проработки конструкции и технологии [2]. Для многономенклатурного производства предложены методы автоматизированного планирования [7], формализации критичных требований [8] и объединения конструкторской и технологической подготовки в цифровой среде [9]. Недостаточно раскрытым остается вопрос о признаках допустимого переноса процесса-аналога для тонкостенных деталей и моменте пересчета деформации.

Цель исследования состояла в разработке порядка построения технологического процесса, при котором ранее проверенные решения применяются после формальной оценки сходства деталей. Для достижения цели определены признаки классификации и мера близости, сформулированы правила сборки маршрута из технологических модулей и предложена расчетная оценка формоизменения. Подход проверялся сравнением двух вариантов обработки одной расчетной детали.

Материалы и методы исследования

Методическая часть опирается на терминологию Единой системы технологической документации [3], требования к электронной технологической документации [4], положения системы технологического обеспечения создания и производства изделий ракетно-космической техники [5] и правила отработки технологических процессов создания изделий [6]. Объект исследования – процессы фрезерной обработки деталей ракетно-космического назначения; предмет – построение маршрута с учетом жесткости, остаточных напряжений, погрешности закрепления и повторного применения проверенных переходов. Аналогичные приемы формализации применяются и в других производствах [12].

Использованы конструкторско-технологическая классификация, размерный анализ, вариантное проектирование и метод конечных элементов для последовательных состояний заготовки. Сравнение проведено на обезличенной модели тонкостенного корпуса, которая не воспроизводит документацию конкретного предприятия. Размеры, допуски и состав элементов заданы в диапазоне, характерном для фрезеруемых деталей из алюминиевых сплавов.

Под технологическим модулем понимается проверенное сочетание базы, способа закрепления, переходов, инструмента, режимов и контрольного действия. Для модуля задаются пределы применимости по геометрии зоны обработки, толщине элементов, вылету инструмента, снимаемому припуску и требуемой точности. При выходе хотя бы одного параметра за установленный диапазон модуль подлежит пересчету.

Для предварительной оценки податливости введено отношение:

$$\lambda = \frac{t_{\min}}{L_{\max}}, \qquad (1)$$

где $t_{\min}$ обозначает наименьшую толщину стенки; $L_{\max}$ – ее наибольший свободный размер.

Степень удаления материала рассчитана как:

$$\mu = 1 - \frac{md}{mz}, \qquad (2)$$

где md и mz – массы детали и заготовки.

Малое значение λ указывает на высокую податливость детали при закреплении и резании, а большое μ – на значительное перераспределение остаточных напряжений после удаления металла. Эти показатели описывают разные причины формоизменения, поэтому дополнительно учитываются материал и его состояние, расположение ребер и карманов, точностная группа и допустимые схемы базирования.

Подбор процесса-аналога основан на признаках, непосредственно влияющих на формообразование. Деталь описывается вектором $x = \{g, m, \lambda, \mu, q, s, r, b\}$, где g – геометрическая группа, m – материал и состояние, q – точность, s – состав обрабатываемых элементов,

Таблица 1. Конструкторско-технологические группы деталей ракетно-космического назначения (составлено авторами)

Группа	Определяющие признаки	Преобладающие методы	Основной риск
Осесимметричные оболочки	Отношение толщины к диаметру; длина; соосность	Токарная обработка; растачивание; шлифование	Потеря круглости; прогиб
Призматические корпуса	Число карманов; ребра; точность баз и отверстий	Фрезерование; сверление; координатная обработка	Коробление; ошибка взаимного положения
Рамные детали	Размер ячейки; высота ребра; открытые стороны	Скоростное фрезерование	Упругое отжатие; вибрация
Панели	Площадь; кривизна; сетка ребер; толщина полотна	Фрезерование; обработка на вакуумной оснастке	Локальная потеря формы
Стыковочные узлы	Точность посадочных поясков и отверстий	Растачивание; координатное сверление; контроль	Нарушение соосности и положения

r – технологическая наследственность, b – допустимые схемы базирования. Числовые признаки нормируются, качественные кодируются. Выбор способа кодирования и весов должен быть обоснован, поскольку он влияет на итоговую близость вариантов.

Конструкторско-технологические группы деталей ракетно-космического назначения представлены в табл. 1.

Для оставшихся после фильтрации процессов рассчитывается взвешенное расстояние до новой детали:

$$d_j = \sqrt{\sum_i w_i \left(\frac{x_i - x_{ji}}{(x_{i,\max} - x_{i,\min})}\right)^2}. \qquad (3)$$

В выражении (3) w_i обозначает вес признака, причем сумма весов равна единице. Для тонкостенного корпуса повышенный вес получают λ, μ, точностная группа q и схема базирования b. Несовместимый материал или иная геометрическая группа служат основанием для исключения процесса. Аналог допускается к проверке, если d_j не превышает порога d_{lim} и маршрут реализуем на имеющемся оборудовании с предусмотренными средствами контроля.

Отобранный маршрут разделяется на модули подготовки баз, чернового съема, стабилизации, получистовой и чистовой обработки, выполнения отверстий и заключительного контроля. Последовательность может переноситься, но припуски, усилия зажима и режимы рассчитываются заново по жесткости промежуточной формы. Этим обоснованное применение аналога отличается от прямого копирования документации.

Построение маршрута начинается с поверхностей, определяющих положение детали на последующих установах. Временная база обеспечивает устойчивость исходной заготовки, постоянные базы сохраняют размерные связи при переустановках. При большой доле удаляемого металла черновые переходы чередуются по сторонам или сопряженным зонам, чтобы снизить одностороннее уменьшение жесткости.

После основной черновой обработки вводится стабилизация: выдержка в раскрепленном состоянии, повторное закрепление с меньшим усилием, контроль формы либо допустимая термическая операция. Выбор зависит от вида полуфабриката, состояния материала и требований конструкторской документации. Чистовые переходы назначаются после проявления основной деформации.

Получистовая стадия выравнивает припуск на точных поверхностях и тем самым уменьшает колебания силы резания. В расчетном маршруте оставляется 0,5 ± 0,1 мм. При недостаточной жесткости сохраняются временные перемычки, опоры или технологические ребра, которые удаляются после формирования соседних поверхностей.

Сокращение числа установов снижает погрешность повторного базирования, но оправдано только при свободном доступе к поверхностям и допустимом вылете инструмента. Если объединение переходов требует длинной фрезы,

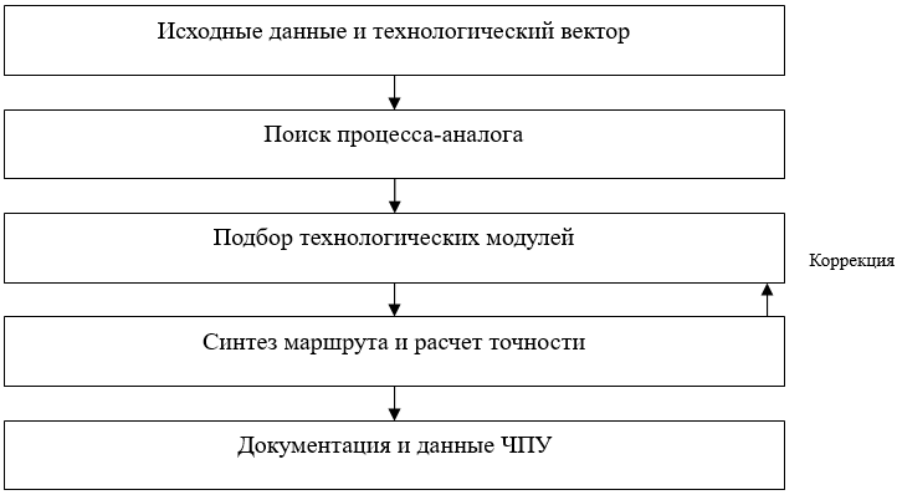


Рис. 1. Алгоритм вариантно-модульного синтеза технологического процесса (составлено авторами)

ее прогиб может превысить погрешность переустановки. Поэтому варианты сравниваются по времени, числу установов и расчетной деформации.

Алгоритм вариантно-модульного синтеза технологического процесса представлен на рис. 1.

После каждого крупного этапа меняются масса и жесткость детали. Итоговое формоизменение складывается из деформации при закреплении, высвобождения остаточных напряжений, упругого отжатия при резании и температурного влияния. Необходимость совместного учета этих факторов подтверждается расчетными исследованиями и обзорами обработки низкожестких деталей [18; 20].

Для предварительного сопоставления маршрутов суммарное отклонение оценивалось по зависимости:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_z^{\,2} + \Delta_r^{\,2} + \Delta_f^{\,2} + \Delta_t^{\,2}}\,. \qquad (4)$$

Здесь Δz характеризует деформацию от закрепления, Δr – результат перераспределения остаточных напряжений, Δf – упругое перемещение от силы резания, Δt – температурное влияние. Корень из суммы квадратов используется, когда направления составляющих заранее не установлены; при известных знаках применяется алгебраическое сложение.

Погрешность Δz определяется для фактического расположения опор, зажимов и контактных зон. Усилие закрепления выбирается из условия неподвижности заготовки с последующей проверкой прогиба. Составляющая Δf рассчитывается для наиболее нагруженного участка траектории по жесткости промежуточной формы.

Наибольшая неопределенность связана с Δr. При отсутствии измеренного поля остаточных напряжений использовались нижний, средний и верхний расчетные уровни. Маршрут признавался устойчивым при соблюдении допуска не только для среднего сценария.

Цифровая модель должна уточняться по данным обработки и измерений. Современные решения связывают расчет, сигналы станка, контроль и прогноз ошибок [13; 15; 16; 19]. В рассматриваемом подходе после черновой и получистовой стадий обновляются геометрия и жесткость. Для сопоставления расчета с замером требуется единая система координат детали, приспособления, станка и измерительной программы [11].

На практике минимальное машинное время и минимальная деформация обычно достигаются разными маршрутами. Чтобы сравнение не сводилось к одному показателю, использован приведенный критерий:

$$J = 0{,}30\frac{T_p}{T_{p0}} + 0{,}25\frac{T_m}{T_{m0}} + 0{,}25\frac{\Delta_{\Sigma}}{|\Delta|} + 0{,}10\frac{N_u}{N_{u0}} + 0{,}10\,(1 - K_m) \to \min\,. \qquad (5)$$

Таблица 2. Проектируемая последовательность операций обработки детали (составлено авторами)

№	Этап	Технологическое содержание
1	Приемка заготовки	Промер габаритов, отклонение от плоскостности, подтверждение марки и состояния материала
2	Подготовка постоянных баз	Фрезерование базовых поверхностей при пониженном усилии прижима
3	Черновое фрезерование, сторона А	Съем 30–35 % общего объема, обход зон вразбивку
4	Черновое фрезерование, сторона Б	Зеркальный съем припуска, промер формы
5	Пауза на стабилизацию	Раскрепление, выдержка, повторный промер
6	Получистовые переходы	Выход на припуск 0,5 ± 0,1 мм по точным поверхностям
7	Отверстия и вспомогательные базы	Работа за один установ при подтвержденной доступности
8	Чистовое фрезерование	Ограничение упругого отжатия, подача корректируется по участкам
9	Итоговый контроль	Координатные измерения детали в свободном состоянии

В формуле (5) *Tp* – трудоемкость разработки процесса, *Tm* – машинное время, *Nu* – число установов, *Km* – доля перенесенных и проверенных модулей; индекс 0 относится к исходному маршруту, [Δ] задает допустимое отклонение формы. Для особо точных поверхностей вес деформации может быть увеличен.

Минимизация *J* проводится при обязательных ограничениях по точности, шероховатости, мощности резания, вылету инструмента и нагрузке на оснастку: $\Delta\Sigma \le [\Delta]$, $Ra \le [Ra]$, $Pc \le Plim$, $l/D \le (l/D)lim$, $Qe \le Qlim$. Нереализуемые варианты исключаются независимо от значения критерия.

Критерий применяется для сравнения маршрутов одной детали при неизменном парке станков. Нормирующие величины принимаются по действующему процессу либо по подтвержденным результатам обработки родственной номенклатуры. Сопоставление разных предприятий или типов производства по этому показателю некорректно.

Объект расчета – призматический корпус из Д16Т размером 420 × 280 × 55 мм с минимальной толщиной стенки 2,5 мм, 18 карманами и 36 отверстиями. Плоскостность базовой поверхности ограничена 0,15 мм, позиционный допуск отверстий – 0,08 мм, шероховатость баз – *Ra* 1,6 мкм. Для плиты 460 × 320 × 70 мм получены $\mu = 0{,}83$ и $\lambda = 0{,}006$, что указывает на высокую долю удаляемого материала и низкую жесткость.

Исходный процесс построен на девяти установах. Карманы одной стороны выбираются почти полностью, после чего корпус переустанавливается для обработки противоположной стороны. Односторонний съем вызывает перераспределение напряжений и изменение формы до второй стадии. Перед чистовым фрезерованием припуск изменяется от 0,3 до 1,1 мм, а расчет упругих перемещений выполняется после подготовки управляющей программы, что приводит к возврату на предыдущие этапы при выявлении недопустимой деформации.

В предлагаемом процессе черновой съем распределен между двумя сторонами, предусмотрены стабилизация и получистовое выравнивание припуска. Заготовка уменьшена до 440 × 300 × 62 мм: ее объем снижен с 10 304 до 8 184 см³, что для Д16Т соответствует примерно шести килограммам металла на корпус. Припуск по наружным сторонам сокращен с 20 до 10 мм, по толщине – с 15 до 7 мм. Опорные площадки и доступ инструмента сохранены, поэтому переработка приспособления не требуется.

Для обоих маршрутов построены последовательные конечно-элементные состояния после формирования баз, черновых переходов, стабилизации и чистовой обработки. После каждой стадии обновлялись геометрия, сетка и жесткость. Остаточные напряжения задавались на трех уровнях; в табл. 3 приведен средний сценарий. Чистовой режим считался допустимым, если упругое перемещение стенки не пре-

Таблица 3. Сравнение исходного и усовершенствованного процессов (составлено авторами по результатам вычислительного эксперимента)

Показатель	До изменения	После изменения	Изменение, %
Трудоемкость разработки процесса, ч	138	89	−35,5
Число установов	9	6	−33,3
Машинное время, ч	28,4	23,6	−16,9
Наибольшее отклонение формы, мм	0,39	0,22	−43,6
Отклонение плоскостности базы, мм	0,18	0,11	−38,9
Доля повторно используемых модулей, %	18	67	+49 п. п.
Коэффициент использования материала	0,17	0,22	+29,4

вышало 40 % допуска ее формы.

В предлагаемом маршруте применены шесть ранее проверенных модулей. Их адаптация сократила трудоемкость проектирования со 138 до 89 ч, а объединение доступных переходов, уменьшение холостых ходов и выравнивание припуска снизили машинное время. Чередование сторон и промежуточная стабилизация уменьшили наибольшее отклонение формы с 0,39 до 0,22 мм.

Значение 0,22 мм относится к наиболее податливой стенке после снятия зажимов и не сопоставляется напрямую с допуском плоскостности базы 0,15 мм. Для базовой поверхности получено 0,11 мм. Итоговое решение принимается по каждому нормируемому элементу отдельно.

Обсуждение результатов

Сравнение показывает, что число операций само по себе не определяет результат. Укрупнение маршрута без пересчета промежуточной жесткости уменьшает число переустановок, но может увеличить прогиб; чрезмерное дробление накапливает погрешность повторного базирования. Улучшение достигается при совместной корректировке маршрута, припусков и закрепления.

Наиболее чувствительным параметром оказалось λ. Уменьшение толщины стенки с 2,5 до 2,0 мм при неизменной силе резания увеличило упругое перемещение примерно в 1,7 раза. В таких условиях требуется снижать радиальную глубину, менять порядок обхода кармана или сохранять временную опору до последнего прохода. Совпадение наружных размеров недостаточно для признания деталей аналогами.

Второй существенный фактор – неравномерность остаточного припуска. Разница более 0,5 мм вызывает колебания нагрузки на фрезу и неодинаковое отжатие стенки. Получистовое выравнивание припуска оказалось результативнее простого снижения подачи на чистовом переходе, поскольку устраняет источник изменения силы резания.

Полученные выводы согласуются с работами, где расчет деформации предлагается выполнять до выпуска окончательной управляющей программы [17], а расчетную геометрию связывать с последующим измерением [14]. Паспорт технологического модуля должен содержать подтвержденный диапазон толщин, состояние заготовки, схему и усилие закрепления, режимы и отклонение после раскрепления. Без этих сведений условия воспроизводимости прежнего результата остаются неизвестными.

Производственную проверку целесообразно начинать с одной однородной группы алюминиевых корпусов и панелей, для которой имеются достоверные протоколы контроля. Для каждого модуля фиксируются пределы применения и правило расчета промежуточной жесткости, а модели детали, заготовки, приспособления и измерительной программы связываются общей системой координат. Перенос подхода на титановые сплавы потребует новой идентификации из-за иных сил резания и более выраженного температурного влияния.

Ограничение исследования состоит в расчетном характере проверки. Для производственного подтверждения требуется партия за-

готовок с измерением формы после чернового съема, стабилизации, получистовой обработки и выдержки в раскрепленном состоянии. Одновременно должны фиксироваться усилия зажима и режимы резания. Эти данные позволят уточнить веса признаков, порог расстояния до аналога и сценарии остаточных напряжений. До такой проверки результаты следует рассматривать как расчетную оценку.

Заключение

Предложенная методика предназначена для тонкостенных деталей ракетно-космического назначения, точность которых в значительной степени определяется податливостью. Процесс-аналог выбирается по измеримым признакам – толщине стенок, соотношению размеров, допускам, материалу и его состоянию. Маршрут собирается из проверенных модулей, но припуски, закрепление и режимы пересчитываются для новой промежуточной геометрии.

Для расчетного корпуса маршрут предусматривает подготовку постоянных баз, попеременный черновой съем с двух сторон, стабилизацию, выравнивание припуска и последующую точную обработку. Упругие перемещения оцениваются до выпуска окончательной управляющей программы, когда еще возможно изменить переход, закрепление или порядок движения инструмента без потери заготовки.

В расчетном примере трудоемкость проектирования снизилась на 35,5 %, число установов – на 33,3 %, машинное время – на 16,9 %, наибольшее отклонение формы – на 43,6 %. Рост точности связан прежде всего с порядком удаления металла, стабилизацией и уменьшением числа переустановок, а не с форсированием режимов. Значения получены вычислительно и должны быть проверены при изготовлении опытной партии.

Список литературы

1. Базров, Б.М. Системный подход применения видов технологии / Б.М. Базров // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7(133). – С. 27–32.
2. Безъязычный, В.Ф. Повышение эффективности изготовления деталей при параллельной работе конструктора и технолога / В.Ф. Безъязычный, Е.В. Растегаев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7(133). – С. 17–26.
3. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М. : Стандартинформ, 2012. – 14 с.
4. ГОСТ Р 3.301-2024. Единая система технологической документации. Электронная технологическая документация. Основные положения. – М. : Российский институт стандартизации, 2024. – 20 с.
5. ГОСТ Р 59860-2021. Ракетно-космическая техника. Система технологического обеспечения создания и производства изделий. Основные положения. – М. : ФГБУ «РСТ», 2021.
6. ГОСТ Р 59174-2020. Ракетно-космическая техника. Система отработки технологических процессов создания изделий. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2020.
7. Митин, С.Г. Совершенствование принципов автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 1(151). – С. 16–22.
8. Назарьев, А.В. Формализация стратегии выявления критичных требований к сборке при проведении технологической подготовки многономенклатурных машиностроительных производств / А.В. Назарьев, П.Ю. Бочкарев, С.Г. Митин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 10(136). – С. 42–48.
9. Помпеев, К.П. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства / К.П. Помпеев, О.С. Тимофеева, Е.И. Яблочников, Е.Е. Волосатова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66. – № 1. – С. 7–15.
10. Постникова, Е.С. Факторы эффективности машиностроительного производства ракетно-космической техники / Е.С. Постникова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 10. – С. 486–492.
11. Решетникова, Е.П. Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного планирования производства / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочка-

рев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 11(137). – С. 25–31.

12. Чукичев, А.В. Интеллектуальные подходы к автоматизации технологической подготовки производства полимерных изделий методом литья под давлением / А.В. Чукичев, О.С. Тимофеева, Ю.С. Андреев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66. – № 1. – С. 16–24.

13. Bakhshandeh, P. Digital Twin Assisted Intelligent Machining Process Monitoring and Control / P. Bakhshandeh, Y. Mohammadi, Y. Altintas, F. Bleicher // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2024. – Vol. 49. – P. 180–190.

14. de Longueville, S. Digital Thread-Based Optimisation Framework for Aeronautical Structures: A Vertical Tail Plane Use Case / S. de Longueville, C. Bouvet, E. Bénard, J. Jézégou, Y. Gourinat // Aerospace. – 2025. – Vol. 12. – № 1. – Art. 2.

15. Fu, X. Digital Twin Technology in Modern Machining: A Comprehensive Review of Research on Machining Errors / X. Fu, H. Song, S. Li, Y. Lu // Journal of Manufacturing Systems. – 2025. – Vol. 79. – P. 134–161.

16. Liu, J. Digital Twin-Enabled Machining Process Modeling / J. Liu, X. Wen, H. Zhou, S. Sheng, P. Zhao, X. Liu, C. Kang, Y. Chen // Advanced Engineering Informatics. – 2022. – Vol. 54. – Art. 101737.

17. Ma, L. Prediction of Milling Deformation for Frame-Type Thin-Walled Parts Considering Workblank Initial Residual Stress and Milling Force / L. Ma, S. Ba, Y. Zhang, H. Liu, L. Li, F. Gao, F. Zhang, J. Ma // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – Vol. 9. – No. 5. – Art. 146.

18. Sun, H. A Review of the Deformation Mechanism and Control of Low Stiffness Thin-Walled Parts / H. Sun, J. Zhao, Z. Zheng, Y. Jiang, X. Jin, S. Deng, Y. Tang, X. Zhang // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2025. – Vol. 60. – P. 322–355.

19. Ward, R. Machining Digital Twin Using Real-Time Model-Based Simulations and Lookahead Function for Closed Loop Machining Control / R. Ward, C. Sun, J. Dominguez-Caballero, S. Ojo, S. Ayvar-Soberanis, D. Curtis, E. Ozturk // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117. – P. 3615–3629.

20. Zhang, Z. Residual Stresses Evolution Mechanism of Thin-Walled Component and Deformation Control Method / Z. Zhang, S. Wang, H. Zhao, D. Zhang, L. Wang // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. – 2024. – Vol. 45. – No. 13. – Art. 629365.

References

1. Bazrov, B.M. Sistemnyy podkhod primeneniya vidov tekhnologii / B.M. Bazrov // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2022. – № 7(133). – S. 27–32.

2. Bez"yazychnyy, V.F. Povysheniye effektivnosti izgotovleniya detaley pri parallel'noy rabote konstruktora i tekhnologa / V.F. Bez"yazychnyy, Ye.V. Rastegayev // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2022. – № 7(133). – S. 17–26.

3. GOST 3.1109-82. Yedinaya sistema tekhnologicheskoy dokumentatsii. Terminy i opredeleniya osnovnykh ponyatiy. – M. : Standartinform, 2012. – 14 s.

4. GOST R 3.301-2024. Yedinaya sistema tekhnologicheskoy dokumentatsii. Elektronnaya tekhnologicheskaya dokumentatsiya. Osnovnyye polozheniya. – M. : Rossiyskiy institut standartizatsii, 2024. – 20 s.

5. GOST R 59860-2021. Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Sistema tekhnologicheskogo obespecheniya sozdaniya i proizvodstva izdeliy. Osnovnyye polozheniya. – M. : FGBU «RST», 2021.

6. GOST R 59174-2020. Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Sistema otrabotki tekhnologicheskikh protsessov sozdaniya izdeliy. Osnovnyye polozheniya. – M. : Standartinform, 2020.

7. Mitin, S.G. Sovershenstvovaniye printsipov avtomatizirovannogo planirovaniya mnogonomenklaturnykh tekhnologicheskikh protsessov mekhanoobrabotki / S.G. Mitin, P.YU. Bochkarev // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2024. – № 1(151). – S. 16–22.

8. Nazar'yev, A.V. Formalizatsiya strategii vyyavleniya kritichnykh trebovaniy k sborke pri provedenii tekhnologicheskoy podgotovki mnogonomenklaturnykh mashinostroitel'nykh proizvodstv /

A.V. Nazar'yev, P.YU. Bochkarev, S.G. Mitin // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2022. – № 10(136). – S. 42–48.

9. Pompeyev, K.P. Avtomatizirovannaya konstruktorsko-tekhnologicheskaya podgotovka v usloviyakh tsifrovogo proizvodstva / K.P. Pompeyev, O.S. Timofeyeva, Ye.I. Yablochnikov, Ye.Ye. Volosatova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. – 2023. – T. 66. – № 1. – S. 7–15.

10. Postnikova, Ye.S. Faktory effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva raketno-kosmicheskoy tekhniki / Ye.S. Postnikova // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2024. – № 10. – S. 486–492.

11. Reshetnikova, Ye.P. Printsipy formirovaniya kompleksa kontrol'no-izmeritel'nykh protsedur v sisteme avtomatizirovannogo planirovaniya proizvodstva / Ye.P. Reshetnikova, P.YU. Bochkarev // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2022. – № 11(137). – S. 25–31.

12. Chukichev, A.V. Intellektual'nyye podkhody k avtomatizatsii tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva polimernykh izdeliy metodom lit'ya pod davleniyem / A.V. Chukichev, O.S. Timofeyeva, YU.S. Andreyev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. – 2023. – T. 66. – № 1. – S. 16–24.

© И.Ю. Лимочко, И.И. Соловьев, И.В. Трифанов, 2026

УДК 621.9.042

И.Н. ХРУСТАЛЕВА, Л.Г. ЧЕРНЫХ, С.Н. СТЕПАНОВ, С.С. СТЕПАНОВ
ФГАУО ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЯ

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация; Парето-оптимизация; рабочий ход; структурная иерархическая модель; технологический маршрут; технологический переход; формообразование.

Аннотация. В работе представлена структура комплексной иерархической модели оптимизации технологического процесса механической обработки. На основании структурных элементов процессов сформирована интегрированная модель комплексной оптимизации технологического процесса механической обработки, содержащая шесть уровней управления. Для каждого уровня управления сформированы векторный критерий оптимизации, множество параметров управления, а также определены критерии оптимизации. Многокритериальная оптимизация производится на основе метода Парето-оптимизации. Целью исследования является повышение эффективности технологической подготовки производства в части разработки технологических процессов механической обработки за счет их структурной и параметрической оптимизации.

Для достижения поставленной цели исследования определены следующие задачи: проведение структурного анализа исследуемого процесса и определение его структурных элементов; разработка иерархической модели управления параметрами исследуемого процесса на основании его структурной декомпозиции; аналитическая формализация структурных элементов исследуемого процесса, формирующих соответствующий уровень управления. Объектом исследования является технологический процесс механической обработки. В работе представлены результаты комплексной оптимизации технологического процесса механической обработки изделия «Втулка», которая позволила повысить качество текстуры поверхности в части параметра *Rz* более чем на 15 %, при этом общая трудоемкость процесса и величина операционных затрат увеличились на 11,9 % и 13,2 % соответственно.

Введение

Машиностроительное изделие, в зависимости от его функционального назначения, обладает определенным набором свойств, обеспечивающих его работоспособность и надежность [1]. Достижение заданных свойств изделия производится за счет комплексной оптимизации параметров технологического процесса. Для этого необходимо проведение структурного и параметрического анализа исследуемого процесса. Данный анализ предполагает структурную декомпозицию и аналитическую формализацию элементов объекта исследования.

Для решения оптимизационных задач в области машиностроения широко применяется метод Парето-оптимизации, при котором значение каждого частного критерия оптимизации, характеризующего исследуемый процесс, не может быть улучшен без ухудшения других [5]. Данный метод позволяет определить множество оптимальных недоминирующих решений, которые формируют фронт Парето.

Модель многокритериальной оптимизации технологического процесса механической обработки

Изготовление изделия на металлообрабатывающем оборудовании является структурно сложным процессом по изменению свойств за-



Рис. 1. Структурные элементы исследуемых объектов

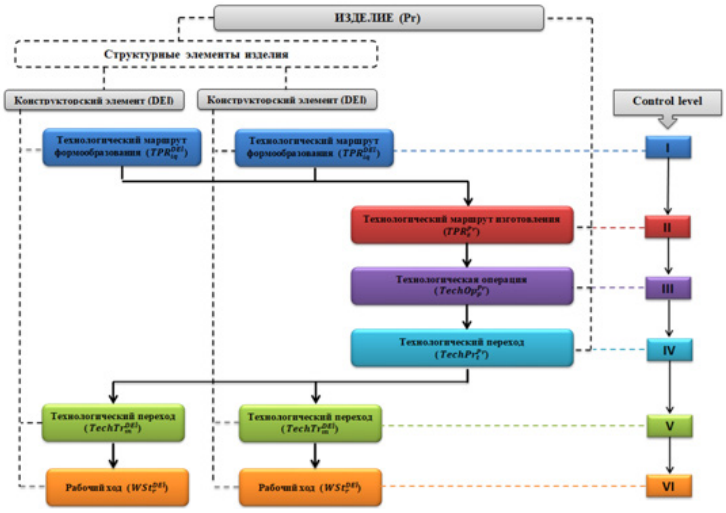


Рис. 2. Интегрированная модель комплексной оптимизации технологического процесса механической обработки

готовки. Управление данным процессом производится поэтапно на основе многокритериального анализа отдельных его структурных элементов.

Основой многоуровневой иерархической модели многокритериальной оптимизации процесса механической обработки являются структурные элементы процессов формообразования двух типов объектов: изделия и отдельных конструкторских элементов, формирующих его структуру. На рис. 1 представлены структурные элементы для соответствующих типов объектов.

На основании множества структурных элементов, представленных на рис. 1, разработана интегрированная модель комплексной оптимизации технологического процесса механической обработки (рис. 2).

Структура интегрированной модели комплексной оптимизации технологического процесса механической обработки состоит из шести уровней управления.

1. Технологический маршрут формообразования конструкторского элемента – TPR_{iq}^{DEl}.
2. Технологический маршрут обработки изделия – TPR_z^{Pr}.
3. Технологическая операция – $TechOp_p^{Pr}$.
4. Технологический переход – $TechTr_t^{Pr}$.
5. Рабочий ход – WSt_r^{DEl}.
6. Рабочий ход – WSt_r^{DEl}.

Постановка задачи управления процессом механической обработки

Задачей первого уровня управления является структурная оптимизация технологических маршрутов формообразования конструкторских элементов, формирующих структуру изделия;

оптимизация методов формообразования, применяемых в процессе реализации соответствующих технологических переходов.

В рамках первого уровня управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации:

$$F_{MachPr}^{CL1} = ((T_{iq}^{DEl/TPR})^{av}((U_{MachPr}^{CL1}),$$
$$(OPEX_{iq}^{DEl/TPR})^{av}((U_{MachPr}^{CL1}),$$
$$(I_{iq}^{DEl/GPr})^{TPR}((U_{MachPr}^{CL1}),$$
$$(I_{iq}^{DEl/SfPr})^{TPR}((U_{MachPr}^{CL1})),$$

где F_{MachPr}^{CL1} – векторный критерий оптимизации технологического процесса механической обработки изделия в рамках первого уровня управления; U_{MachPr}^{CL1} – множество параметров управления технологическим процессом механической обработки изделия в рамках первого уровня управления; $(T_{iq}^{DEl/TPR})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину трудоемкости реализации основных действий и вспомогательных переходов, выполняемых в рамках технологического маршрута формообразования q-го конструкторского элемента i-го типа, мин.; $(OPEX_{iq}^{DEl/TPR})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину операционных затрат, возникающих в процессе выполнения основных действий и вспомогательных переходов, реализуемых в рамках технологического маршрута формообразования q-го конструкторского элемента i-го типа, руб.; $(I_{iq}^{DEl/GPr})^{TPR}$ – целевой показатель, характеризующий уровень точности исполнения геометрических параметров, формируемых в процессе реализации технологического маршрута формообразования q-го конструкторского элемента i-го типа; $(I_{iq}^{DEl/SfPr})^{TPR}$ – целевой показатель, характеризующий уровень точности исполнения параметров текстуры поверхности q-го конструкторского элемента i-го типа, формируемых в процессе реализации технологического маршрута формообразования.

Задачей второго уровня управления является структурная оптимизация средств производства (технологическое оборудование, установочно-зажимные приспособления), применяемых в процессе реализации соответствующего технологического маршрута обработки изделия.

В рамках второго уровня управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации:

$$F_{MachPr}^{CL2} = ((\left(T_s^{Pr/\mathrm{TPR}}\right)^{AuxAc}(U_{MachPr}^{CL2}),$$
$$(T_s^{Pr/TPR})^{PFAc/av}\left(U_{MachPr}^{CL2}\right),$$
$$(OPEX_s^{Pr/TPR})^{PFAc/av}\left(U_{MachPr}^{CL2}\right),$$
$$(OPEX_s^{Pr/TPR})^{AuxAc}\left(U_{MachPr}^{CL2}\right),$$
$$(I_{TPR}^{Pr/GPr})^{av}(U_{MachPr}^{CL2})),$$

где F_{MachPr}^{CL2} – векторный критерий оптимизации технологического процесса механической обработки изделия в рамках второго уровня управления; U_{MachPr}^{CL2} – множество параметров управления технологическим процессом механической обработки изделия в рамках второго уровня управления; $(T_s^{Pr/TPR})^{AuxAc}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину трудоемкости выполнения вспомогательных действий, реализуемых в рамках s-го технологического маршрута изготовления изделия, мин.; $(T_s^{Pr/TPR})^{PFAc/av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину трудоемкости выполнения подготовительно-заключительных действий, реализуемых в рамках s-го технологического маршрута изготовления изделия, мин.; $(OPEX_s^{Pr/TPR})^{PFAc/av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину операционных затрат, возникающих в процессе выполнения подготовительно-заключительных действий, реализуемых в рамках s-го технологического маршрута изготовления изделия, руб.; $(OPEX_s^{Pr/TPR})^{AuxAc}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину операционных затрат, возникающих в процессе выполнения вспомогательных действий, реализуемых в рамках s-го технологического маршрута изготовления изделия, руб.; $(I_{TPR}^{Pr/GPr})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий средний уровень точности исполнения геометрических параметров, описывающих конфигурацию z-го изделия в процессе реализации технологического маршрута.

Задачей третьего уровня управления является оптимизация методов определения фактических параметров режущих инструментов и положения заготовки в рабочей зоне оборудования, применяемых в процессе наладки технологического оборудования для реализации соот-

ветствующих технологических операций.

В рамках третьего уровня управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации:

$$F_{MechPr}^{CL3} = ((\left(T_p^{Pr/TechOp}\right)^{PFAc}(U_{MechPr}^{CL3}),$$
$$(OPEX_p^{Pr/TechOp})^{PFAc}(U_{MechPr}^{CL3}),$$
$$(Err_p^{TechOp/GPr})_i^{AdjMach}(U_{MechPr}^{CL3})),$$

где F_{MechPr}^{CL3} – векторный критерий оптимизации технологического процесса механической обработки изделия в рамках третьего уровня управления; U_{MechPr}^{CL3} – множество параметров управления технологическим процессом механической обработки изделия в рамках третьего уровня управления; $(T_p^{Pr/TechOp})^{PFAc}$ – целевой показатель, характеризующий величину трудоемкости выполнения подготовительно-заключительных действий, реализуемых в рамках p-й технологической операции, мин.; $(OPEX_p^{Pr/TechOp})^{PFAc}$ – целевой показатель, характеризующий величину операционных затрат, возникающих в процессе выполнения подготовительно-заключительных действий, реализуемых в рамках p-ой технологической операции, руб.; $(Err_p^{TechOp/GPr})_i^{AdjMach}$ – целевой показатель, характеризующий величину погрешности наладки технологического оборудования для реализации p-ой технологической операции, мкм.

Задачей четвертого уровня управления является оптимизация параметров режущих инструментов, применяемых в процессе реализации соответствующих технологических переходов. В рамках четвертого уровня управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации:

$$F_{MechPr}^{CL4} = ((T_t^{Pr/TechTr})^{av}\left(U_{MechPr}^{CL4}\right),$$
$$(OPEX_t^{Pr/TechTr})^{av}\left(U_{MechPr}^{CL4}\right),$$
$$(I_{TechTr}^{Pr/GPr})_t^{av}\left(U_{MechPr}^{CL4}\right),$$
$$(I_{TechTr}^{Pr/Sf})_t^{av}\left(U_{MechPr}^{CL4}\right)),$$

где F_{MechPr}^{CL4} – векторный критерий оптимизации технологического процесса механической обработки изделия в рамках четвертого уровня управления; U_{MechPr}^{CL4} – множество параметров управления технологическим процессом механической обработки изделия в рамках четвертого уровня управления; $(T_t^{Pr/TechTr})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину трудоемкости реализации основных действий и вспомогательных переходов, выполняемых в рамках t-го технологического перехода, мин.; $(OPEX_t^{Pr/TechTr})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину операционных затрат, возникающих в результате реализации основных действий и вспомогательных переходов, выполняемых в рамках t-го технологического перехода, мин.; $(I_{TechTr}^{Pr/GPr})_t^{av}$ – целевой показатель, характеризующий средний уровень точности исполнения геометрических параметров, описывающих конфигурацию изделия после реализации t-го технологического перехода; $(I_{TechTr}^{Pr/Sf})_t^{av}$ – целевой показатель, характеризующий средний уровень точности исполнения параметров текстуры поверхности изделия, сформированных в процессе реализации t-го технологического перехода.

Задачей пятого уровня управления является структурная и параметрическая оптимизация технологических переходов, реализуемых в процессе формообразования соответствующих конструкторских элементов. В рамках пятого уровня управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации:

$$F_{MechPr}^{CL5} = ((T_m^{DEl/TechTr})^{av}(U_{MechPr}^{CL5}),$$
$$(OPEX_m^{DEl/TechTr})^{av}\left(U_{MechPr}^{CL5}\right),$$
$$(I_{TechTr}^{DEl/GPr})_m^{av}(U_{MechPr}^{CL5})),$$

где F_{MechPr}^{CL5} – векторный критерий оптимизации технологического процесса механической обработки изделия в рамках пятого уровня управления; U_{MechPr}^{CL5} – множество параметров управления технологическим процессом механической обработки изделия в рамках пятого уровня управления; $(T_m^{DEl/TechTr})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину трудоемкости реализации основных действий в процессе выполнения m-го технологического перехода при формообразовании конструкторского элемента, мин.; $(OPEX_m^{DEl/TechTr})^{av}$ – целевой показатель, характеризующий среднюю величину операционных затрат, возникающих в процессе реализации основных действий и вспомогательных переходов, выполняемых в рамках m-го технологического перехода при формообразовании конструкторского элемен-

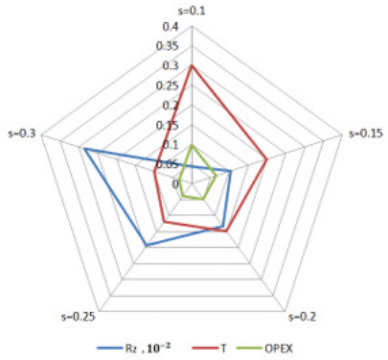


Рис. 3. График зависимости целевых показателей от величины подачи

та, руб.; $(I_{TechTr}^{DEl/GPr})_m^{av}$ – целевой показатель, характеризующий средний уровень точности исполнения геометрических параметров, описывающих конфигурацию конструкторского элемента после реализации *m*-го технологического перехода.

Задачей шестого уровня управления является параметрическая оптимизация рабочих ходов, реализуемых в процессе формообразования соответствующих конструкторских элементов. В рамках шестого уровня управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации:

$$F_{MechPr}^{CL6} = ((T_r^{DEl/WSt})^{FomAc}(U_{MachPr}^{CL6}),$$
$$(OPEX_r^{DEl/WSt})^{FomAc}(U_{MachPr}^{CL6}),$$
$$(Err_r^{GPr})_i^{col.}(U_{MachPr}^{CL6}),(Vol_{qr}^{SfPr})_j^{col.}(U_{MachPr}^{CL6})),$$

где F_{MachPr}^{CL6} – векторный критерий оптимизации технологического процесса механической обработки изделия в рамках шестого уровня управления; U_{MachPr}^{CL6} – множество параметров управления технологическим процессом механической обработки изделия в рамках шестого уровня управления; $(T_r^{DEl/WSt})^{FomAc}$ – целевой показатель, характеризующий величину трудоемкости реализации действий по изменению свойств заготовки в процессе выполнения *r*-го рабочего хода, мин.; $(OPEX_r^{DEl/WSt})^{FomAc}$ – целевой показатель, характеризующий величину операционных затрат, возникающих в процессе выполнения действий по изменению свойств заготовки в процессе выполнения *r*-го рабочего хода, руб.; $(Err_r^{GPr})_j^{col.}$ – целевой показатель, характеризующий расчетное значение *i*-го геометрического параметра, формируемого в рамках *r*-го рабочего хода, мкм; $(Vol_r^{SfPr})_j^{col.}$ – целевой показатель, характеризующий расчетное значение *j*-го параметра текстуры поверхности, формируемого в рамках *r*-го рабочего хода.

Оптимизация параметров процесса формообразования наружной цилиндрической поверхности

В рамках проводимого исследования была поставлена задача оптимизации параметров технологического процесса формообразования детали «Втулка», изготавливаемой из дисперсно-упрочненного композиционного сплава САС-50. В рамках исследования для данной детали была определена следующая задача исследования: оптимизация значений параметров текстуры поверхности – *Rk*, *Rpk*, *Rvk*. Формирование данных параметров текстуры поверхности производится в рамках финишного этапа обработки.

Этап финишной обработки содержит два технологических перехода. Первый технологический переход реализуется при следующих значениях параметров резания: v = 600 м/мин; t = 0,3 мм; s = 0,1–0,3 мм/об. На рис. 3 представлен график зависимости целевых показателей от величины подачи.

Для данного технологического перехода определена следующая стратегия оптимизации: $Rz_r \rightarrow min$. Таким образом, оптимальными значениями параметров реализации данного технологического перехода являются: v = 600 м/мин; t = 0,3 мм; s = 0,1 мм/об. При этом целевые показатели будут иметь следующие значения: $(T_1^{DEl/WSt})^{FomAc}$ = 0,29 мин.; $(OPEX_1^{DEl/WSt})^{FomAc}$ = 0,1 руб.; Rz_1 = 4,26 мкм.

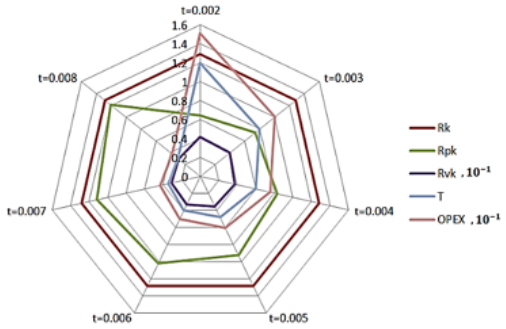


Рис. 4. График зависимости целевых показателей от глубины резания

Второй технологический переход реализуется при следующих значениях параметров резания: v = 600 м/мин; t = 0,002–0,008 мм; s = 0,1 мм/об. На рис. 3 представлен график зависимости целевых показателей от величины подачи, а на рис. 4 – от глубины резания.

В рамках данного технологического перехода определена следующая стратегия оптимизации: $Rpk_2 \rightarrow min$. Таким образом, оптимальными значениями параметров реализации данного технологического перехода являются: v = 600 м/мин; t = 0,002 мм; s = 0,1 мм/об. При этом целевые показатели будут иметь следующие значения: $(T_1^{DEl/WSt})^{FomAc}$ = 1,19 мин.; $(OPEX_1^{DEl/WSt})^{FomAc}$ = 15,1 руб.; Rk_2 = 1,28; Rpk_2 = 0,64; Rvk_2 = 4,17.

Заключение

В процессе выполнения исследования была разработана структура интегрированной модели многокритериальной оптимизации параметров технологического процесса механической обработки изделия. На основании разработанной модели проведена структурная и параметрическая оптимизация процесса изготовления изделия «Втулка». Проведенная структурная и параметрическая оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Втулка» позволила повысить качество текстуры поверхности в части параметра *Rz* на 17,5 %, при этом общая трудоемкость процесса и величина операционных затрат увеличились на 11,9 % и 13,2 % соответственно.

Список литературы

1. Бровкина, Я.Ю. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки / Я.Ю. Бровкина, И.Н. Хрусталева, М.Б. Хрусталев, В.Н. Хохловский, В.П. Шкодырев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 2. – С. 7–20.

2. Zhetessova, G. Model of Optimization of Process Parameters for Machining of Separate Design Elements of the Product / G. Zhetessova, I. Khrustaleva, V. Shkodyrev, O. Zharkevich, A. Kanatova, M. Kozhanov, G. Tattimbetova, G. Abdugaliyeva // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – Art. 5395.

3. Savelyeva, N. Implementation of Simulation Modeling of Single and High-Volume Machine-Building Productions / N. Savelyeva, T. Nikonova, G. Zhetessova, I. Khrustaleva, V. Yurchenko, O. Černašėjus, O. Zharkevich, E. Dandybaev, A. Berg, S. Vassenkin et al. // Designs. – 2024. – Vol. 8. – № 2. – Art. 24.

4. Khrustaleva, I. The Model for Optimizing Cutting Parameters for Processing Products on Metal-Cutting Machines / I. Khrustaleva, M. Khrustalev, Y. Brovkina, V. Khokhlovskiy, V. Shkodyrev // Cybernetics and Physics. – 2024. – Vol. 13. – № 2. – P. 111–122.

5. Черных, Л.Г. Расчет систематической составляющей первичного профиля с учетом относительных колебаний / Л.Г. Черных, С.Н. Степанов, И.Н. Хрусталева // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 4(142). – С. 113–116.

6. Хрусталева, И.Н. Модель многокритериальной оптимизации технологического маршрута

обработки конструкторского элемента изделия / И.Н. Хрусталева, Л.Г. Черных, М.Б. Хрусталев, Я.Ю. Бровкина // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 5(167). – С. 98–105.

References

1. Brovkina, YA.YU. Iyerarkhicheskaya model' optimizatsii tekhnologicheskikh parametrov kompleksa rabochikh perekhodov dlya protsessa mekhanicheskoy obrabotki / YA.YU. Brovkina, I.N. Khrustaleva, M.B. Khrustalev, V.N. Khokhlovskiy, V.P. Shkodyrev // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2024. – № 2. – S. 7–20.

5. Chernykh, L.G. Raschet sistematicheskoy sostavlyayushchey pervichnogo profilya s uchetom otnositel'nykh kolebaniy / L.G. Chernykh, S.N. Stepanov, I.N. Khrustaleva // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2023. – № 4(142). – S. 113–116.

6. Khrustaleva, I.N. Model' mnogokriterial'noy optimizatsii tekhnologicheskogo marshruta obrabotki konstruktorskogo elementa izdeliya / I.N. Khrustaleva, L.G. Chernykh, M.B. Khrustalev, YA.YU. Brovkina // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 5(167). – S. 98–105.

© И.Н. Хрусталева, Л.Г. Черных, С.Н. Степанов, С.С. Степанов, 2026

УДК 658.5

С.Е. МАЛЬЦЕВ, А.А. РОМАНОВ
АНО ДПО «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» имени академика В.П. Ефремова», г. Москва;
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МЕХАНИЗМ ПРИОРИТИЗАЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗЕРВОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ

Ключевые слова: приоритизация; производственная мощность; резервирование производственной мощности; устойчивость производственной системы.

Аннотация. В статье рассматривается задача повышения устойчивости производственных систем промышленных предприятий на основе резервирования производственных мощностей. Предложен интегрированный механизм, объединяющий методику определения приоритета резервирования и организационно-технические процедуры формирования, поддержания готовности и использования резервов. Механизм включает аналитический, организационно-технический и эксплуатационный контуры, объединенные обратной связью. Показано, что резерв производственной мощности целесообразно рассматривать не как свободную часть производственного потенциала, а как организационно и технически подготовленную способность производственной системы компенсировать дефицит основной мощности.

Введение

Производственная мощность является одной из базовых характеристик производственной системы и одновременно объектом управления, от объективности оценки которого зависят качество планирования, уровень загрузки оборудования и возможности выполнения производственной программы. В настоящее время максимальная загрузка не всегда является наиболее рациональным режимом работы предприятия, в некоторых случаях предлагается разделять технически возможную и экономически целесообразную производственную мощность. Комплексно на объем использования мощности влияют технические, организационные и экономические факторы. Производственную мощность необходимо рассматривать как самостоятельный объект стратегического управления, а не только как расчетную характеристику [1]. Анализ производственной системы как совокупности технологически взаимосвязанных составляющих позволяет выявлять ограничения отдельных элементов системы [2].

Резервирование мощностей приобретает важнейшее значение для устойчивого и надежного процесса производства. Российские исследования показывают, что рациональный резерв позволяет компенсировать нарушения синхронности работы взаимосвязанных подразделений, изменения производственной нагрузки и влияние факторов, снижающих результативность функционирования производственной системы [3].

Одним из направлений повышения устойчивости промышленного предприятия является резервирование критически значимых производственных мощностей [4]. При этом наличие незагруженной мощности не означает автоматической готовности к ее использованию. Возможность ввода такой мощности зависит от технического состояния оборудования, персонала, технологической оснастки, документации, материальных ресурсов и других обеспечивающих факторов. Поэтому целью исследования является разработка интегрированного механизма, связывающего определение приоритета резервирования с последующим формированием и использованием производственного резерва.

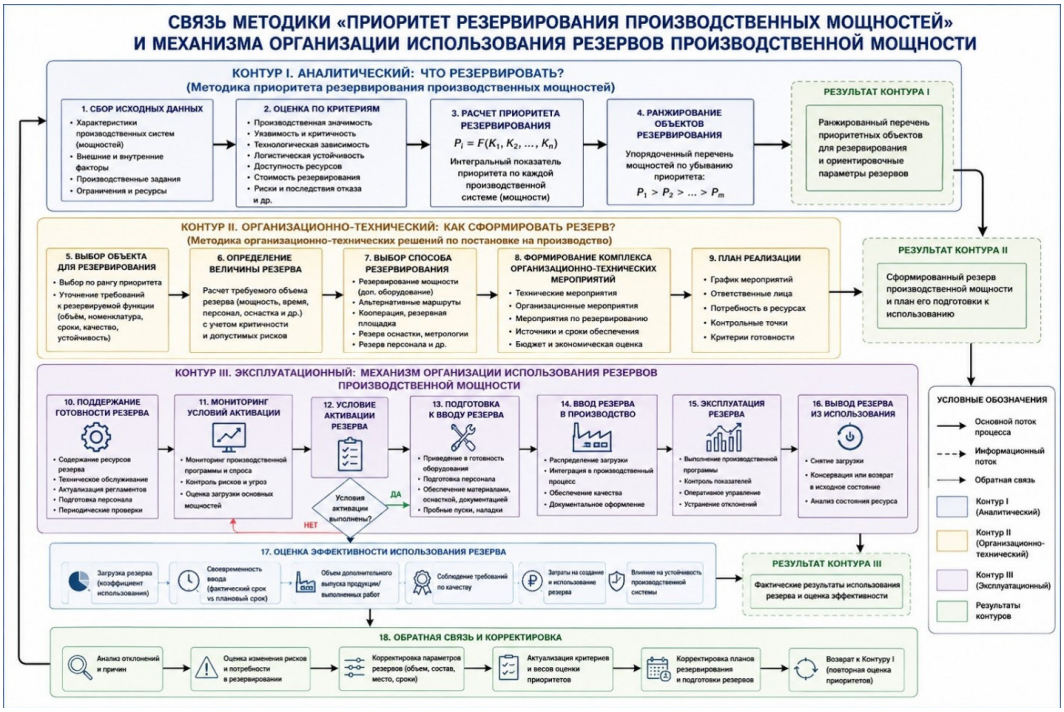


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи резервирования и организации использования резервных производственных мощностей

Методика определения приоритета резервирования

Первым элементом механизма является многокритериальная оценка производственных мощностей. Интегральный показатель приоритета резервирования определяется выражением:

$$P_i = F(K_{1i}, K_{2i}, \ldots, K_{ni}),$$

где P_i – приоритет резервирования i-й производственной мощности; K_{1i}, …, K_{ni} – значения критериев оценки.

Критерии целесообразно объединять в три функциональных блока: «Загрузка – Значимость – Уязвимость». Такое деление позволяет рассматривать резервирование как свободный ресурс с ограничениями, способными повлиять на устойчивость производства.

Первый блок характеризует загрузку производственной мощности и наличие внутренних компенсационных возможностей без изменения производственной структуры. Второй блок – это показатель влияния на исполнение программы производства. Третий блок – это блок технологических, технических, метрологических и логистических ограничений.

Основными показателями, описывающими данную систему, определим коэффициент использования производственной мощности и потенциальную свободную мощность:

$$K_{\text{исп}\,i} = \frac{Q_i}{M_i},$$

$$R_{\text{пот}\,i} = M_i - Q_i = M_i(1 - K_{\text{исп}\,i}),$$

где Q_i – фактический или плановый объем производственной программы; M_i – располагаемая производственная мощность.

Величина $R_{\text{пот}i}$ показывает только возможность использования освобождающейся части мощности. Исследования в области данной тематики с учетом структуры выпуска продукции и ожидаемого эффекта приводят к использованию обобщенного показателя приоритета:

$$P_i = F(Z_i, S_i, V_i),$$

где Z_i – загрузка; S_i – производственная значимость; V_i – уязвимость.

В дальнейшем необходимо провести ранжирование величин показателей для определения очередности и принятия решения о резер-

вировании исследуемых мощностей:

$$P_1 > P_2 > ... > P_m.$$

Полученные результаты ранжирования являются исходными данными для структурно-функционального механизма резервирования производственных мощностей. В предлагаемом подходе в его составе выделяются три последовательно связанных контура: аналитический, организационно-технический и эксплуатационный.

Аналитический контур предназначен прежде всего для определения объектов, в отношении которых целесообразно рассматривать вопрос о резервировании. При этом объектом анализа целесообразно принимать не предприятие в целом, а конкретную производственную мощность либо производственное звено. Сформированный перечень передается в организационно-технический контур, где для выбранных объектов определяется уже не их место в рейтинге, а конкретный вариант формирования резервной мощности и условия ее подготовки к возможному использованию.

Организационно-технический контур преобразует результаты ранжирования в параметры конкретного решения. Для выбранной производственной мощности определяется требуемый резерв:

$$R_{\text{тр } i} = max(0, Q_{\text{тр } i} - M_{\text{дост } i}),$$

где $R_{\text{тр } i}$ – требуемая величина резерва; $Q_{\text{тр } i}$ – необходимая производственная способность; $M_{\text{дост } i}$ – гарантированно доступная мощность.

Далее определяется способ формирования резерва. В зависимости от характеристик производственной системы он может быть создан за счет дополнительного оборудования, альтернативного технологического маршрута, повышения сменности, использования резервной площадки, кооперационной мощности либо резервирования персонала и обеспечивающих ресурсов. Т.А. Понкратова с соавторами связывают величину производственного резерва с экономическим эффектом как у производителя, так и у потребителя продукции и подчеркивают необходимость поиска рационального, а не максимально возможного уровня резервной мощности [3]. В результате организационно-технической подготовки осуществляется переход от $R_{\text{пот } i}$ к сформированному резерву мощности $R_{\text{сф } i}$. Тем самым свободная часть производственной мощности преобразуется в ресурс, для которого заранее определены условия, средства и порядок использования.

Эксплуатационный контур обеспечивает поддержание сформированного резерва в состоянии готовности и его активацию. Необходимость разделения сформированного и реально подготовленного резерва для ввода в работу обусловлена тем, что фактическая доступность использования мощности меняется в течение временного периода ввиду технических, кадровых и ресурсных ограничений. Формализуем уровень готовности коэффициентом:

$$K_{\text{гот}} = \frac{R_{\text{гот}}}{R_{\text{сф}}},$$

где $R_{\text{гот}}$ – объем резерва, фактически готового к вводу; $R_{\text{сф}}$ – общий объем сформированного резерва.

В процессе определяем параметры производственной программы, загрузки основной мощности, состояния оборудования и ресурсных ограничений. Состояние готовности сохраняется до активации резерва при определенных условиях. Так, сформированный резерв считается готовым только после подтверждения возможности его фактического использования. Ввод резерва, в свою очередь, требуется тогда, когда действующих мощностей становится недостаточно для выполнения производственной программы. Изменение состояния резерва может быть представлено в виде последовательности:

$$R_{\text{пот } i} \rightarrow R_{\text{сф } i} \rightarrow R_{\text{гот } i} \rightarrow R_{\text{акт } i} \rightarrow R_{\text{исп } i}.$$

Данная последовательность показывает, что резерв свободной мощности не статичен и возможно управлять его состояниями. Формирование обратной связи является важным элементом оценки эффективности механизма. Ее необходимость обусловлена тем, что производственная мощность является динамической характеристикой. Изменения номенклатуры, состава оборудования, технологии и организации производства приводят к изменению располагаемой мощности и структуры производственных ограничений. Кроме того, наличие значительной незагруженной мощности в промышленности не всегда означает возможность ее оперативной мобилизации. А.В. Алексеев показывает



Рис. 2. Связь элементов механизма резервирования производственных мощностей

существенную отраслевую неоднородность загрузки российских производственных мощностей и ограниченность прямой интерпретации свободной мощности как готового резерва для наращивания выпуска [5].

Эффективность резервирования предлагается оценивать через фактическое использование сформированной мощности. Оценка должна учитывать также своевременность ввода, затраты на формирование и содержание резерва и его фактическое влияние на выполнение производственной программы. Полученные результаты возвращаются в аналитический контур, тем самым механизм приобретает адаптивный характер.

Результаты и выводы

Предложенный подход объединяет две взаимосвязанные задачи. Методика приоритизации определяет, какие производственные мощности требуют первоочередного резервирования, а организационно-технический механизм определяет, каким образом соответствующий резерв должен быть сформирован, подготовлен и использован.

Основным отличием предлагаемого подхода является разграничение потенциального, сформированного, готового, активированного и фактически использованного резерва. Такое разделение позволяет учитывать не только величину незагруженной производственной мощности, но и фактическую способность предприятия использовать ее при возникновении дополнительной потребности. Наличие обратной связи обеспечивает пересмотр параметров резервирования с учетом результатов эксплуатации. Следовательно, резервирование производственной мощности рассматривается как непрерывный организационно-технический процесс, направленный на обеспечение устойчивости выполнения производственной программы.

Список литературы

1. Демидова, Е.А. Производственная мощность: проблематика формализации понятия и методики оценки / Е.А. Демидова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1(103).

2. Замбржицкая, Е.С. Применение графо-матричных моделей в стратегическом анализе оптимальности производственных мощностей предприятий черной металлургии / Е.С. Замбржицкая // Экономический анализ: теория и практика. – 2021. – Т. 20. – № 8(515). – С. 1495–1515.

3. Понкратова, Т.А. Некоторые аспекты определения экономического эффекта от создания резервов производственных мощностей / Т.А. Понкратова, Е.В. Кучерова, Т.А. Тюленева, О.В. Се-

клецова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 5-1. – С. 77–84.

4. Мальцев, С.Е. Совершенствование системы управления дублированием производственных мощностей промышленного предприятия / С.Е. Мальцев // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2026. – № 1(169). – С. 52–57.

5. Алексеев, А.В. Мобилизация резервов мощностей в российской промышленности: альтернатива или иллюзия активизации инвестиционного процесса? / А.В. Алексеев // ЭКО. – 2022. – Т. 52. – № 4. – С. 113–137. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2022-4-113-137.

6. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М. : Российский институт стандартизации, 2021.

7. ГОСТ Р ИСО 22301-2021. Надежность в технике. Системы менеджмента непрерывности деятельности. Требования. – М. : Российский институт стандартизации, 2021.

References

1. Demidova, Ye.A. Proizvodstvennaya moshchnost': problematika formalizatsii ponyatiya i metodiki otsenki / Ye.A. Demidova // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. – 2021. – № 1(103).

2. Zambrzhitskaya, Ye.S. Primeneniye grafo-matrichnykh modeley v strategicheskom analize optimal'nosti proizvodstvennykh moshchnostey predpriyatiy chernoy metallurgii / Ye.S. Zambrzhitskaya // Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika. – 2021. – T. 20. – № 8(515). – S. 1495–1515.

3. Ponkratova, T.A. Nekotoryye aspekty opredeleniya ekonomicheskogo effekta ot sozdaniya rezervov proizvodstvennykh moshchnostey / T.A. Ponkratova, Ye.V. Kucherova, T.A. Tyuleneva, O.V. Sekletsova // Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava. – 2021. – № 5-1. – S. 77–84.

4. Mal'tsev, S.Ye. Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya dublirovaniyem proizvodstvennykh moshchnostey promyshlennogo predpriyatiya / S.Ye. Mal'tsev // Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii. – 2026. – № 1(169). – S. 52–57.

5. Alekseyev, A.V. Mobilizatsiya rezervov moshchnostey v rossiyskoy promyshlennosti: al'ternativa ili illyuziya aktivizatsii investitsionnogo protsessa? / A.V. Alekseyev // EKO. – 2022. – T. 52. – № 4. – S. 113–137. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2022-4-113-137.

6. GOST R 27.102-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"yekta. Terminy i opredeleniya. – M. : Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021.

7. GOST R ISO 22301-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Sistemy menedzhmenta nepreryvnosti deyatel'nosti. Trebovaniya. – M. : Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021.

© С.Е. Мальцев, А.А. Романов, 2026

УДК 65.012.2

Ю.Л. МАСЛЕННИКОВА
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

УПРАВЛЕНИЕ ВНЕПЛАНОВЫМИ ЗАКАЗАМИ НА ОПЫТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ключевые слова: внеплановый заказ; интервальное планирование; оперативное планирование; опытное производство; приоритизация; устойчивость.

Аннотация. Цель статьи – разработка инструментария оперативного управления внеплановыми заказами на опытном производстве (**ОП**). Задачи: многокритериальная приоритезация заказов (***TOPSIS***), оценка устойчивости производственной структуры, интервальное прогнозирование длительности технологических операций на основе смешанных вероятностных распределений, алгоритмизация управления в нотации *BPMN* 2.0. Гипотеза заключается в том, что интеграция предложенных инструментов обеспечивает повышение обоснованности управленческих решений в условиях стохастичности ОП за счет комплексного учета неопределенности длительностей, технологических издержек и критериальной значимости заказов. Методология базируется на аппарате многокритериального анализа, экономико-математического моделирования, теории вероятностей и процессного моделирования. Результаты: разработан и формализован алгоритм управления, включающий инструменты приоритизации, оценки устойчивости и интервального планирования, позволяющие формировать временные буферы и ранжировать заказы экономически обоснованно.

Введение

Сегодня отечественные машиностроительные предприятия столкнулись с необходимостью разработки и выпуска технологичных изделий, узлов, агрегатов в сжатые сроки. Актуальной проблемой опытных производств, на базе которых происходит доводка конструкций и технологий изготовления сложных видов техники, является оперативное планирование процесса производства [1]. Возвратные операции, характерные для опытного производства, обусловливают рост издержек, что связано с изменяющимися маршрутами движения предметов труда, появлением узких мест на производстве. Отработка конструкторских, технологических решений происходит в оперативном режиме, перепланирования, связанные с элементами возврата, обусловливают последующее появление внеплановых производственных заказов, что требует оперативного управления и постоянной координации. Поэтому необходимо развитие методов оперативного планирования в части оценки последовательности и длительности выполнения производственных внеплановых заказов.

Методы

Существующие детерминированные методы не учитывают колебания длительности процессов и риски их невыполнения [2; 3]. Вероятностные подходы ограничены одним типом распределения и дискретными оценками средних продолжительностей, что не отражает разнообразия процессов ОП [4; 5]. Кроме того, внеплановые заказы оцениваются лишь по критерию срочности, а методы оценки устойчивости игнорируют возможные изменения оперативного плана.

Результаты

Для управления внеплановым заказом на ОП в рамках оперативного планирования автором предложен алгоритм (рис. 1). Основными блоками являются «Определение очередности выполнения внепланового заказа», «Оценка издержек при изменении технологических маршрутов на ОП» и «Интервальная оценка длитель-

Таблица 1. Критерии значимости заказа для ОП

Критерии значимости заказа для ОП	Высший балл (8–10)	Низший балл (1–3)
Срочность (запас времени до сдачи клиенту)	Срок изготовления по контракту близится к концу	Высокий запас времени ожидания
Важность	Спецзаказ / Госзаказ / Инозаказчик	Стандартный / Внутренний заказ
Степень готовности незавершенного производства	Утвержденный прототип	Первичный цикл обработки
Размер штрафных санкций в случае срыва сроков поставки	Существенные издержки	Отсутствие штрафных санкций
Репутационные потери в случае срыва сроков поставки	Существенные издержки	Несущественные издержки
Наличие ресурсов для выполнения заказа	В наличии	Ожидание поставки ресурсов

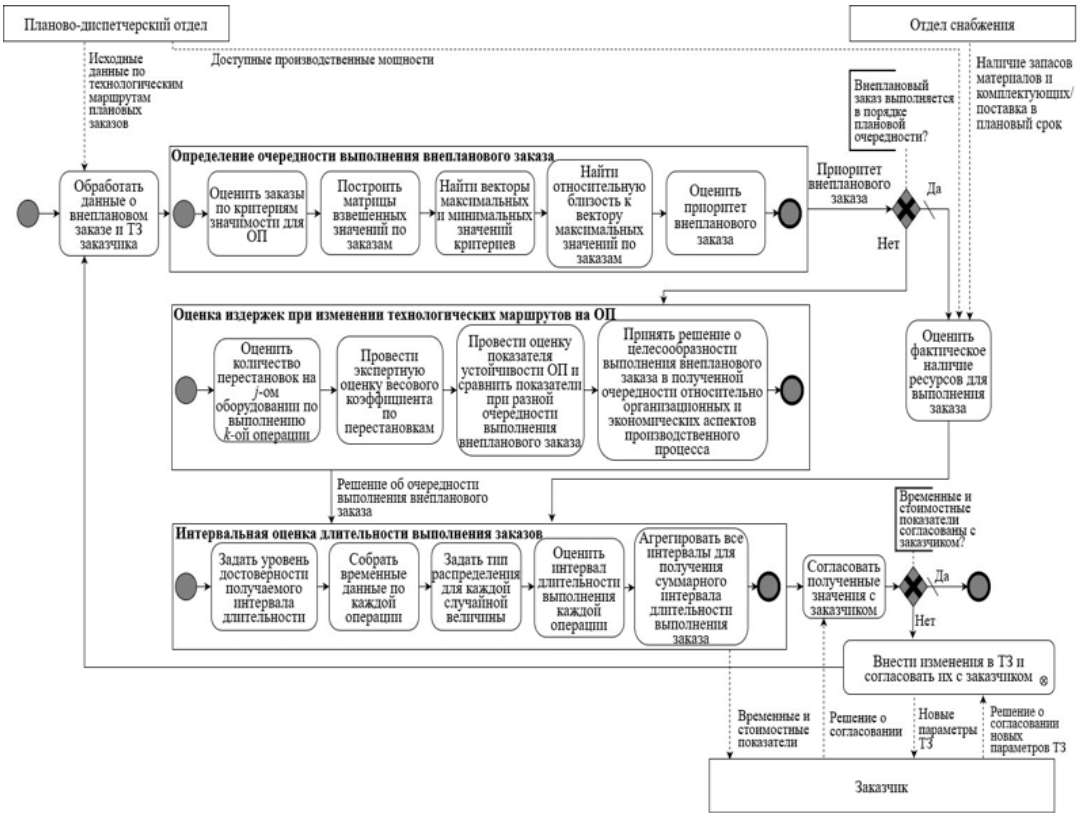


Рис. 1. Алгоритм управления внеплановыми заказами на ОП

ности выполнения заказов».

1. Определение очередности выполнения внепланового заказа. Задача определения очередности выполнения заказов на рабочем месте, технологическом участке либо в предметно-замкнутом контуре состоит в поиске оптимального порядка выполнения операций. Существуют статическая и динамическая вариации решения задачи. Подробное описание методов приводится в следующих работах [6; 7].

На практике изделия запускаются в про-

изводство в том же порядке, в котором регистрируются на обработку. Такой подход в совокупности с несбалансированностью производственных мощностей приводит к возникновению в потоке производства роста незавершенного производства.

Автором предлагается инструмент, позволяющий оценить приоритет, учитывая комплекс критериев значимости заказа для ОП (табл. 1) [8].

Очередность выполнения заказа оценивается с помощью многокритериального метода принятия решений *TOPSIS*. Алгоритм метода *TOPSIS* [9].

Если значения внепланового заказа наиболее приближены к вектору максимальных значений взвешенных оценок критериев, он выполняется первым в производственном задании, то есть ему присваивается абсолютный приоритет. Относительным приоритетом обладает заказ, имеющий более низкий приоритет, чем абсолютный, но более высокий, чем плановый заказ. При минимальной относительной близости к идеально-позитивному решению внеплановый производственный заказ обрабатывается в плановой очередности.

2. Оценка издержек при изменении технологических маршрутов на ОП. Изменение технологических маршрутов ведет к нарушению связей производственной структуры ОП [10]. Под устойчивостью ОП в работе понимается способность выполнения производственных заказов на базе производственной структуры в соответствии с требованиями заказчика при различных возмущающих воздействиях.

Предложен показатель устойчивости ОП, отражающий состав оборудования, набор и последовательность выполнения технологических операций, чувствительность исходного плана к появлению издержек, вызванных появлением внеплановых заказов [8]:

$$U_{\text{ст}} = \sum_{j=1}^{L} \sum_{k=1}^{K_j} \alpha_k^j \beta_k^j = 0,$$

где L – количество оборудования, участвующего в оперативно-производственном плане (j = 1, …, L); K_j – число различных операций, выполняемых на j-м оборудовании в исходном производственном плане (k = 1, …, K_j); α_k^j – количество перестановок на j-м оборудовании по выполнению k-й операции (вариации исходного технологического маршрута), возникающих по причине изменения приоритетности выполнения заказов; β_k^j – весовой коэффициент одной перестановки по k-й операции jго оборудования, отражающий появление издержек; $U_{\text{ст}} = 0$, если оперативный план не чувствителен к появлению перестановок, вызывающих издержки в силу небольшой длительности и идентичности операций.

Стохастичность характера производственного процесса ОП приводит к проблеме дискретной оценки длительности технологических операций и полных сроков выполнения заказов.

3. Инструмент интервальной оценки длительности выполнения заказов. Для оценки длительности процессов производства предлагается оперировать треугольным и трапециевидным распределениями. Время выполнения каждой технологической операции рассматривается как случайная величина со смешанным распределением [9]:

$$f = \sum_{k=1}^{n} C_k f_k,$$

где $f_1, f_2, \dots, f_n$ – экспертные значения плотности распределения случайных величин (**СВ**), отражающие наиболее реалистичные длительности выполнения операции; $C_1, C_2, \dots, C_n$ – веса экспертных данных.

Вероятность того, что СВ примет значение, лежащее в интервале (a, b):

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)\mathrm{d}x,$$

где a и b – искомые значения интервала длительности выполнения операции; P – функция распределения СВ. Тогда:

$$P(a < X < b) \geq \gamma,$$

где γ – заданный уровень доверия.

Для нахождения значений a, b приняты следующие уравнения:

$$\begin{cases} b - a \to \min \\ \int_a^b f(x)\mathrm{d}x \geq \gamma \end{cases}.$$

В случае если по заказу дано неполное штучное время, оно принимается за ожидаемую оценку (te). Оптимистичные и пессимистичные значения tp и to рассчитываются следующим

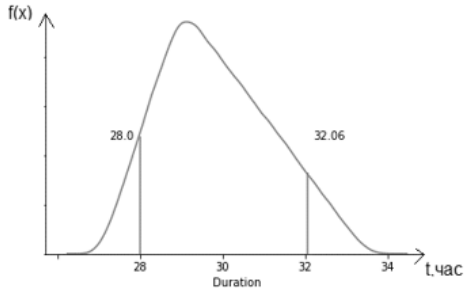


Рис. 2. Интервальная длительность изготовления комплектующего бокового прицепа мотоцикла с доверительным интервалом 80 %

образом:

$$t_o = t_e * (0{,}9 + \varepsilon),$$
$$t_p = t_e * (1{,}2 + \varepsilon),$$

где ε – случайная величина, равномерно распределенная на интервале [–0,05; 0,05]. Оптимистическое время взято с коэффициентом 0,9, а пессимистическое – с коэффициентом 1,2 в связи с учетом сложности процессов ОП.

С целью определения интервала длительности выполнения всего заказа происходит суммирование случайных величин каждой операции, интервал также будет удовлетворять заранее заданному уровню доверия γ. Для оценки суммы случайных величин используется центральная предельная теорема (**ЦПТ**).

Пример графического представления интервальной оценки длительности приведен на рис. 2 [9].

Заключение

Таким образом, инструмент приоритизации внеплановых заказов позволяет на основе разработанных критериев значимости оценить очередность их выполнения. Подход к оценке устойчивости ОП позволяет оценить целесообразность перестановок в оперативном плане при возникновении приоритетного внепланового заказа.

Инструмент позволит обеспечивать контроль выполнения операций в определенном временном диапазоне, создавать временной буфер для возникновения и обработки внеплановых заказов.

Список литературы

1. Масленникова, Ю.Л. Исследование и систематизация факторов развития цифровизации опытного производства // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 1(127). – С. 58–61.

2. Wilson, J.M. Gantt charts: A centenary appreciation // European Journal of Operational Research. – 2003. – Т. 149. – № 2. – С. 430–437.

3. Bagshaw, K.B. PERT and CPM in project management with practical examples // American Journal of Operations Research. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 215–226.

4. Perrucci, D.V. Using the critical path method (CPM) for evaluating allocation potential of temporary housing units / D.V. Perrucci et al. // Journal of Housing and the Built Environment. – 2025. – Т. 40. – No. 3. – P. 1113–1125.

5. Мищенко, А.В. Динамическое и прогнозно-реактивное планирование проектов, реализуемых в условиях ресурсных ограничений и интенсивных стохастических воздействий // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2026. – № 2(82). – С. 40–57.

6. Обухов, К.О. Метод генетического программирования решения задачи оперативно-календарного планирования дискретного производства / К.О. Обухов, И.Ю. Квятковская, А.В. Морозов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2024. – № 6(242). – С. 42–52.

7. Бурдо, Г.Б. Автоматизированное составление оперативных планов для механообрабаты-

вающих подразделений мелкосерийного машиностроения / Г.Б. Бурдо, Н.А. Семенов // Программные продукты и системы. – 2025. – Т. 38. – № 2. – С. 305–314.

8. Масленникова, Ю.Л. Разработка инструментов поддержки принятия решений при оперативном планировании опытного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22 / Ю.Л. Масленникова. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. – С. 142.

9. Hwang, C.L. Methods for multiple attribute decision making / C.L. Hwang, K. Yoon // Multiple attribute decision making. – Berlin, Heidelberg : Springer, 1981. – P. 58–191.

10. Бром, А.Е. Оценка организационной устойчивости опытного производства с учетом приоритетности выполнения заказов / А.Е. Бром, Ю.Л. Масленникова // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 8. – С. 39–42.

References

1. Maslennikova, YU.L. Issledovaniye i sistematizatsiya faktorov razvitiya tsifrovizatsii opytnogo proizvodstva // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 1(127). – S. 58–61.

5. Mishchenko, A.V. Dinamicheskoye i prognozno-reaktivnoye planirovaniye proyektov, realizuyemykh v usloviyakh resursnykh ogranicheniy i intensivnykh stokhasticheskikh vozdeystviy // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2026. – № 2(82). – S. 40–57.

6. Obukhov, K.O. Metod geneticheskogo programmirovaniya resheniya zadachi operativno-kalendarnogo planirovaniya diskretnogo proizvodstva / K.O. Obukhov, I.YU. Kvyatkovskaya, A.V. Morozov // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2024. – № 6(242). – S. 42–52.

7. Burdo, G.B. Avtomatizirovannoye sostavleniye operativnykh planov dlya mekhanoobrabatyvayushchikh podrazdeleniy melkoseriynogo mashinostroyeniya / G.B. Burdo, N.A. Semenov // Programmnyye produkty i sistemy. – 2025. – T. 38. – № 2. – S. 305–314.

8. Maslennikova, YU.L. Razrabotka instrumentov podderzhki prinyatiya resheniy pri operativnom planirovanii opytnogo proizvodstva: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.22 / YU.L. Maslennikova. – M. : MGTU im. N.E. Baumana, 2022. – S. 142.

10. Brom, A.Ye. Otsenka organizatsionnoy ustoychivosti opytnogo proizvodstva s uchetom prioritetnosti vypolneniya zakazov / A.Ye. Brom, YU.L. Maslennikova // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. – 2021. – № 8. – S. 39–42.

© Ю.Л. Масленникова, 2026

УДК 658.5.012.7

А.Г. НИКОЛАЕВА, А.С. ЦВЕТКОВ, В.М. КОНДРАТЬЕВА
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТРУБ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Ключевые слова: новые методики контроля качества; предприятие; производственный цикл трубных сталей.

Аннотация. Целью работы является обоснование целесообразности внедрения методики ускоренных испытаний углеродистых сталей на склонность к возникновению водородного охрупчивания в качестве элемента производственного контроля качества трубной продукции. Задачами работы являются определение слабых и сильных сторон, а также угроз при внедрении разработанной методики в практику работы заводской лаборатории. Гипотеза исследования заключается в том, что разработанная ускоренная методика испытаний позволяет достоверно оценивать склонность трубных сталей к водородному охрупчиванию при существенном сокращении продолжительности испытаний и может быть внедрена в практику заводских лабораторий без значительных организационных и технических изменений. Для решения поставленных задач использовался такой метод стратегической оценки, как *SWOT*-анализ. В результате выполненной работы установлено, что практическое применение разработанной методики позволяет сократить сроки и объемы проведения автоклавных испытаний сталей в сторонних специализированных лабораториях, выполняемых для квалификации материалов для эксплуатации в системах транспортировки водородного топлива.

Введение

Для развития водородной энергетики необходимо обеспечить безопасную и эффективную транспортировку водорода трубопроводным транспортом. Однако склонность углеродистых сталей к возникновению такого эффекта, как водородное охрупчивание, является серьезным препятствием к использованию существующей газотранспортной инфраструктуры или новых трубопроводов для транспортировки водородного топлива. Влияние водорода на свойства углеродистых сталей заключается в уменьшении пластичности и стойкости к распространению трещин у материалов вследствие их насыщения водородом.

Обеспечение стойкости трубной продукции к воздействию водорода является одной из приоритетных задач системы управления качеством предприятий-производителей. Снижение пластичности материалов в водородсодержащих средах относится к дефектам повышенного риска, поскольку проявляется при эксплуатации изделия и может приводить к серьезным последствиям, связанным с аварийными ситуациями и экономическими потерями. В этой связи создание методик и подходов для оценки качества металлопродукции для работы в водородсодержащих средах является весьма актуальным [1–6].

Современные методы контроля качества трубной продукции для эксплуатации в водородной среде

В настоящий момент в нашей стране отсутствуют стандарты, регламентирующие проведение испытаний на трубах для транспортировки водорода. Введенные в 2025 г. новые стандарты ГОСТ Р 71928 («Трубы стальные сварные для транспортирования газообразного водорода. Технические условия» (введен с 06.01.2025 г.)) и ГОСТ Р 71927 («Трубы стальные бесшовные для транспортирования газообразного водорода. Технические условия»



Рис. 1. Концепция методики: а – наводороживание образца электролитическим методом; б – механические испытания

(введен с 06.01.2025 г.)) являются началом формирования комплекса нормативно-технической документации для водородной инфраструктуры. Однако эти стандарты устанавливают исключительно требования к структуре и свойствам материалов трубопроводов для транспортировки водорода без указания проведения необходимых испытаний в водородсодержащих средах.

За рубежом оценка применимости материалов для эксплуатации в водородсодержащих средах производится путем проведения длительных, дорогостоящих испытаний с использованием автоклавов (сосудов высокого давления). Методологические сложности этих видов испытаний препятствуют развитию данной области исследований.

Автоклавные испытания материалов в водородсодержащих средах высокого давления проводят в крупных исследовательских лабораториях. Для создания подобного лабораторного участка на базе заводской лаборатории необходимы значительные капитальные и организационные затраты (закупка оборудования высокого давления, организация системы газовой обвязки и систем безопасности, обучение персонала). В этой связи создание более легко воспроизводимого метода оценки стойкости сталей к возникновению водородного охрупчивания стало весьма актуальной задачей.

Разработка и внедрение методики в систему управления качеством трубной продукции

В подавляющем большинстве случаев металлургические предприятия вынуждены направлять образцы своей продукции в специализированные испытательные лаборатории на квалификационные испытания (для оценки их склонности к водородному охрупчиванию). Для сокращения расходов, сроков и одновременного охвата большей номенклатуры продукции изготовитель в состоянии выполнять предварительную оценку качества трубной продукции в условиях заводской лаборатории. В связи с этим в Санкт-Петербургском политехническом университете была разработана «Методика электролитического наводороживания для ранжирования низколегированных сталей по стойкости к водородному охрупчиванию» [7].

Основными принципами, которыми руководствовались авторы методики, являются доступность используемого оборудования, воспроизводимость и низкая длительность испытаний. В основу разрабатываемой методики испытаний был положен подход, заключающийся в предварительном наводороживании образца электролитическим методом (рис. 1а) с последующими механическими испытаниями на растяжение на воздухе с быстрой скоростью деформации (рис. 1б). При поляризации стали в электролите на ее поверхности выделяются ионы водорода, действие которых аналогично действию атомов, полученных при диссоциации водорода при высоком давлении. Подбор параметров режима электролитического наводороживания позволил добиться такой концентрации водорода на стальном образце, которая эквивалентна повышенному давлению газа.

Режим проведения испытаний по разра-

Таблица 1. *SWOT*-анализ перспектив внедрения разработанной методики на металлургическом предприятии

Сильные стороны (***S***)	Слабые стороны (***W***)
1. Уменьшение экономических и временных затрат на проведение квалификационных испытаний материалов на стойкость к возникновению водородного охрупчивания в сторонних лабораториях. 2. Возможность воспроизвести испытания по методике в условиях производственной лаборатории, так как для ее реализации используется исключительно стандартное оборудование. 3. Возможность безопасного проведения испытаний благодаря использованию электролитического наводороживания, исключающего применение газообразного водорода, который относится к легковоспламеняющимся и взрывоопасным газам 4. Для внедрения методики отсутствует необходимость в наличии персонала, работающего с сосудами под давлением. При этом подготовка персонала для выполнения испытаний может быть осуществлена в короткие сроки	1. Необходимость калибровки режимов электролитического наводороживания при испытании сталей с нетипичной микроструктурой. 2. Неполная экспериментальная база данных (методика апробирована на ограниченном количестве марок трубных сталей). 3. Невозможность воспроизводить эксплуатационные условия (повышенное давление, длительное время эксплуатации, циклические нагрузки, а также комплексное воздействие эксплуатационных факторов)
Возможности (***O***)	Угрозы (***T***)
1. Разработанная методика может быть использована при создании и совершенствовании стандартов, регламентирующих оценку стойкости трубных сталей к водородному охрупчиванию. 2. Сравнительный анализ большого количества сталей по стойкости к водородному охрупчиванию. 3. Повышение надежности трубной продукции и снижение рисков эксплуатационных отказов. 4. Создание новых сталей, устойчивых к возникновению водородного охрупчивания	1. Ограниченное нормативное регулирование применения ускоренных методов испытаний. 2. Возможность расхождения результатов с автоклавными испытаниями в газообразном водороде высокого давления. 3. Консерватизм предприятий металлургической отрасли при внедрении новых методов испытаний и модернизации системы контроля качества

ботанной методике подобран таким образом, чтобы ускоренно имитировать воздействие водорода на сталь, аналогичное воздействию при газовых испытаниях. При этом время испытаний одного образца составляет не более 8 часов, что более чем в 12 раз меньше, чем при использовании стандартных испытаний с использованием газообразного водорода. Даже с учетом затрат только рабочего времени это обеспечивает значительное сокращение трудозатрат (нормочасов) и, как следствие, снижение стоимости проведения испытаний одного образца.

Разработанная методика не позволит заменить автоклавные испытания, однако использование ее как экспресс-метода для отбора наиболее перспективных материалов позволит сократить объемы дорогостоящих квалификационных испытаний. В свою очередь, это уменьшит временные и экономические затраты предприятия на оценку водородостойкости его продукции. Такой подход также позволит снизить риск отбраковки материалов на завершающих этапах испытаний.

SWOT-анализ перспектив внедрения разработанной методики

Для рассмотрения ключевых факторов,

определяющих необходимость использования разработанной методики производителями трубной продукции, использовался такой метод стратегического планирования, как *SWOT*-анализ (табл. 1). Результаты анализа показывают, что основными сильными сторонами методики являются сокращение объемов дорогостоящих газовых испытаний в сторонних лабораториях, а также быстрое и не требующее больших вложений внедрение в систему контроля качества. Одной из дополнительных возможностей разработанной методики является ранжирование большого количества выпускаемых сталей по стойкости к водородному охрупчиванию в относительно короткие сроки. Основной потенциальной угрозой является возможность расхождения результатов по ускоренной методике с результатами стандартизированных методов. Однако с увеличением накопленной базы результатов испытаний степень расхождений значительно снижается. Применение разработанной методики позволит ускорить процесс создания новых сталей для применения в объектах водородной инфраструктуры.

Заключение

Разработанная методика испытаний сталей может быть использована для ускоренной оценки склонности к возникновению водородного охрупчивания трубных сталей в условиях завода-изготовителя. В связи с простотой, безопасностью, а также отсутствием необходимости использовать газообразный водород высокого давления методика может быть легко внедрена в процесс контроля качества на металлургическом предприятии.

Преимуществами разработанной методики являются сокращение сроков проведения испытаний одного материала, а также отсутствие рисков, возникающих при работе с газообразным водородом. Внедрение методики не требует капитальных затрат, а также наличия сотрудников, имеющих допуск к работе с сосудами под давлением.

Полученные с использованием разработанной методики результаты будут использованы для совершенствования технологии производства сталей, стойких к эксплуатации в среде водорода.

Список литературы

1. A systematic study on the influence of electrochemical charging conditions on the hydrogen embrittlement behaviour of a pipeline steel / P. Zhang, M. Laleh, A.E. Hughes, R.K.W. Marceau, T. Hilditch, M.Y. Tan // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – V. 48. – P. 16501–16516.

2. Physical modeling of steel resistance to hydrogen embrittlement / N.O. Shaposhnikov, A.S. Tsvetkov, D.A. Strekalovskaya, A.G. Nikolaeva, N.A. Devyaterikova // Key Engineering Materials. – 2023. – Vol. 943. – P. 91–96.

3. Николаева, А.Г. Использование методики ускоренной оценки стойкости углеродистой трубной стали к водородному охрупчиванию / А.Г. Николаева, С.А. Цветков, А.А. Альхименко, В.М. Кондратьева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 2. – С. 89–96.

4. Колачев, Б.А. Водородная хрупкость металлов / Б.А. Колачев. – М. : Металлургия, 1985. – 217 с.

5. Correlation between Microstructure and Hydrogen Degradation of 690 MPa Grade Marine Engineering Steel / M. Heng, T. Huiyn, X. Juncheng, C. Zhongyu // Materials. – 2021. – № 14.

6. Исследование изменения механических свойств низкоуглеродистой трубной стали после воздействия газообразного водорода под давлением / А.С. Цветков, П.П. Степанов, А.Ю. Михалев, А.В. Мунтин, С.Е. Дагаев, А.Г. Николаева // Металлург. – 2025. – № 10. – С. 20–25.

7. Сравнительный анализ водородного охрупчивания трубных сталей при испытании в газообразной среде и при наводороживании электролитическим способом / А.С. Цветков, С.Ю. Настич, А.Б. Арабей, Д.Н. Романенко, А.В. Мунтин, А.Г. Николаева // Черные металлы. – 2026. – № 3. – С. 69–76.

References

3. Nikolayeva, A.G. Ispol'zovaniye metodiki uskorennoy otsenki stoykosti uglerodistoy trubnoy stali k vodorodnomu okhrupchivaniyu / A.G. Nikolayeva, S.A. Tsvetkov, A.A. Al'khimenko, V.M. Kondrat'yeva // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2026. – № 2. – S. 89–96.

4. Kolachev, B.A. Vodorodnaya khrupkost' metallov / B.A. Kolachev. – M. : Metallurgiya, 1985. – 217 s.

6. Issledovaniye izmeneniya mekhanicheskikh svoystv nizkouglerodistoy trubnoy stali posle vozdeystviya gazoobraznogo vodoroda pod davleniyem / A.S. Tsvetkov, P.P. Stepanov, A.YU. Mikhalev, A.V. Muntin, S.Ye. Dagayev, A.G. Nikolayeva // Metallurg. – 2025. – № 10. – S. 20–25.

7. Sravnitel'nyy analiz vodorodnogo okhrupchivaniya trubnykh staley pri ispytanii v gazoobraznoy srede i pri navodorozhivanii elektroliticheskim sposobom / A.S. Tsvetkov, S.YU. Nastich, A.B. Arabey, D.N. Romanenko, A.V. Muntin, A.G. Nikolayeva // Chernyye metally. – 2026. – № 3. – S. 69–76.

© А.Г. Николаева, А.С. Цветков, В.М. Кондратьева, 2026

УДК 621.3.019.3

А.А. СОФРОНОВ, В.В. БУЛАТОВ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ключевые слова: деревья отказов; деревья событий; марковские процессы; надежность технических систем; программный комплекс; расчет надежности; структурная схема надежности.

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ программных комплексов для расчета надежности технических систем. Целью исследования является анализ программных комплексов для расчета надежности технических систем. Задачи: рассмотреть основные отличия, а также преимущества и недостатки относительно аналитических возможностей каждой из систем, составить сравнительную матрицу функциональных возможностей. В качестве основной гипотезы принимается, что отечественные и альтернативные зарубежные технические системы сопоставимы по функциональным возможностям и поддержке стандартов расчета надежности. В качестве методов исследования используются обзор и сравнительный анализ технической и научной литературы. Результаты: проведено сопоставление отечественных (*Pragmatica*, НАДЕЖНОСТЬ, АРБИТР, АСОНИКА-К, АСОНИКА-Б) и зарубежных решений (*Reliability Workbench*, *Availability Workbench*, *ITEM ToolKit*, *RAM Commander*, *Windchill Quality Solutions*, *RiskSpectrum*, *MADE*) по функциональным возможностям и поддержке стандартов. В работе выделены основные отличия программных комплексов: отечественные комплексы ориентированы на решение отраслевых задач с учетом национальной нормативной базы, зарубежные – на универсальность применения и широкий спектр аналитических возможностей.

Надежность технических систем в современной инженерной практике рассматривается как самостоятельная область знаний, объединяющая вероятностные модели отказов, методы анализа риска и инструменты управления жизненным циклом изделия. Становление надежности как отдельного направления началось с отказа от идеи эквивалентности терминов «надежность» и «прочность». Такое представление было характерно до середины XIX в. Увеличение запаса прочности эффективно лишь в рамках статической постановки задачи и простых устройств. Для машин и конструкций, работающих при переменных нагрузках, определяющими параметрами являются процессы накопления повреждений и разброс параметров материалов. Это приводит к тому, что разрушение возможно при напряжениях, не превышающих предел, а отказ носит вероятностный характер.

Начало развития надежности связано с активным развитием железнодорожной техники в XIX в., где сочетались рост нагрузок на элементы и циклический характер нагрузок. Расследование причин Версальской железнодорожной катастрофы стало основой для научных работ А. Велера. Он определил количественную зависимость между амплитудой напряжений и числом циклов до разрушения (*S–N*-кривые) и выявил вариативность долговечности для одинаковых образцов. Его работы стали переходом от представления об отказе как о единичном событии к пониманию отказа как вероятностного процесса [1].

Существенное влияние на развитие вероятностных методов описания надежности оказали работы В. Вейбулла, посвященные описанию распределения времени до отказа. Такие модели позволили формировать функции надежности и риска, оценивать параметры по экспериментальным данным и переходить к

прогнозу вероятности отказа на заданном интервале времени [2]. Для инженерной практики это означало возможность обоснованного сравнения конструктивных решений и режимов эксплуатации без ожидания статистики отказов за большой период эксплуатации.

Следующим важным этапом расширения области применения теории надежности можно считать развитие радиоэлектроники, авиации и ракетно-космической техники. В данных сферах часто требовалось определять параметры надежности в условиях, когда невозможно собрать достаточно статистических данных об изделиях в эксплуатации, что стало стимулом развития теоретических методов расчета показателей надежности. Ключевыми методами стали логико-вероятностный анализ, деревья отказов, анализ видов и последствий отказов. Эти методы ориентированы на причинно-следственную природу событий, выделение критических сочетаний отказов и количественную оценку вклада элементов и сценариев.

Для многих электронных компонентов справочные и эмпирические коэффициентные модели оказались недостаточными при тяжелых режимах работы и миниатюризации самих изделий. Это стало началом изучения физики отказов и методов ее анализа. При этом деградация компонентов рассматривается через термомеханические, коррозионные, диффузионные, усталостные и иные механизмы с учетом профилей нагрузок. Карты рабочих режимов, где задаются ожидаемые нагрузки и электрические параметры работы элемента в составе схемы, стали применяться для описания условий эксплуатации отдельных элементов схем. Такой подход позволил более точно рассматривать сложные системы с учетом влияния условий эксплуатации.

Кроме того, в этот период дополнительным вопросом рассмотрения в теории надежности стала надежность человека и организационные факторы, влияющие на вероятность ошибочных действий оператора в реальных сценариях эксплуатации [1].

В современных подходах с распространением гибридных методов расчета меняется и сама постановка вычислительной задачи. При этом организация расчетов имеет не меньшую значимость, чем выбор самой методики расчета надежности, поскольку современные технические системы имеют большое число взаимосвязанных элементов, различные режимы работы, а также резервирование, восстановление и зависимые отказы. В результате увеличиваются объем исходных данных и число учитываемых переменных, которые необходимо последовательно согласовывать в рамках единой модели. Возникает необходимость совместной работы и импорта результатов моделирования и расчетов из других программных продуктов [3].

Высокая сложность систем и переход от отдельных формул и локальных оценок к комплексным методам оценки требуют применения математических пакетов для организации вычислений. Универсальные инструменты, такие как электронные таблицы, *MATLAB* или *Mathcad*, удобны для прототипирования, учебных примеров и типовых задач, однако их применение ограничено, когда требуются воспроизводимость результатов, коллективная работа или последующий аудит расчетов. По мере роста размерности модели возрастает риск скрытых ошибок в формулах, неоднозначного использования справочных данных, а также несогласованности версий программного обеспечения – невозможности открытия файлов в обновленной версии программы. Эти обстоятельства обусловили развитие специализированных программных комплексов по расчету надежности. Функции данных программ обычно включают обработку и валидацию исходных данных, построение модели системы, расчет показателей надежности и формирование отчетности. Практическая ценность подобных комплексов состоит не только в корректной реализации алгоритмов, но и в возможности верификации расчетов и интеграции в процессы системной инженерии и управления жизненным циклом изделия. Такие программные пакеты могут интегрироваться как в *PDM*-, так и в *ERP*-системы для получения данных об эксплуатации уже существующих изделий, а также для оценки остаточного ресурса на основании данных для предиктивного ремонта.

На сегодняшний день качество подготовки специалистов определяется не только знанием методологии, но и умением работать с программными комплексами и инструментами для проведения расчетов. На этом уровне возникает разрыв между содержанием дисциплины «надежность» и условиями ее практического освоения. Согласно работе [4], в образовательной среде данный разрыв усиливается дефицитом материально-технической базы: лишь в 11 % программ рабочих дисциплин присут-

Таблица 1. Сравнение функциональных возможностей ПК

	Справочные системы и БД	*CAD, CAE, PLM, PDM, ERP*	*FMEA/FMECA*	Марковские процессы	Деревья отказов	Деревья событий	Анализ статистики отказов	Структурные схемы надежности	Оптимизация ЗИП
Pragmatica	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
НАДЕЖНОСТЬ	✓							✓	
АРБИТР					✓			✓	
АСОНИКА-К	✓	✓					✓	✓	✓
АСОНИКА-Б	✓	✓						✓	✓
Reliability Workbench	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Availability Workbench	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓
ITEM ToolKit		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
RAM Commander	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Windchill Quality Solutions	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Risk Spectrum			✓		✓	✓	✓		
MADE	✓	✓	✓	✓	✓			✓	

ствуют лабораторные стенды. Одновременно сохраняется проблема со специализированным программным обеспечением по расчету надежности: большинство решений ориентировано на инженерную эксплуатацию, у производителей часто отсутствуют доступные демонстрационные версии и стоимость лицензий ограничивает возможность закупки университетами. В результате практические занятия часто строятся на стандартных офисных пакетах, которые пригодны для базовых вычислений, но не отражают реальной специфики расчетов надежности в проектных организациях.

Рассмотренное выше показывает необходимость системного обзора современных программных комплексов по расчету надежности. Важно рассматривать их не как перечень продуктов, а как инструменты с различным набором реализуемых методик, глубиной верификации модели и различной логикой работы с исходными данными. Отдельного анализа требует соответствие программных решений международным, государственным и отраслевым стандартам.

В работе выполнен обзор и сравнение программных комплексов для расчета надежности. Для этого были проанализированы научные публикации, техническая документация на программное обеспечение (**ПО**) (описание назначения и области применения, руководства пользователя/оператора, материалы для разработчиков), а также сведения с официальных сайтов компаний. Такой подход позволяет оценить не только заявленные возможности программных комплексов, но и то, насколько доступно описание порядка работы и расчетов.

Отбор программных продуктов проводился по следующим критериям. Во-первых, про-

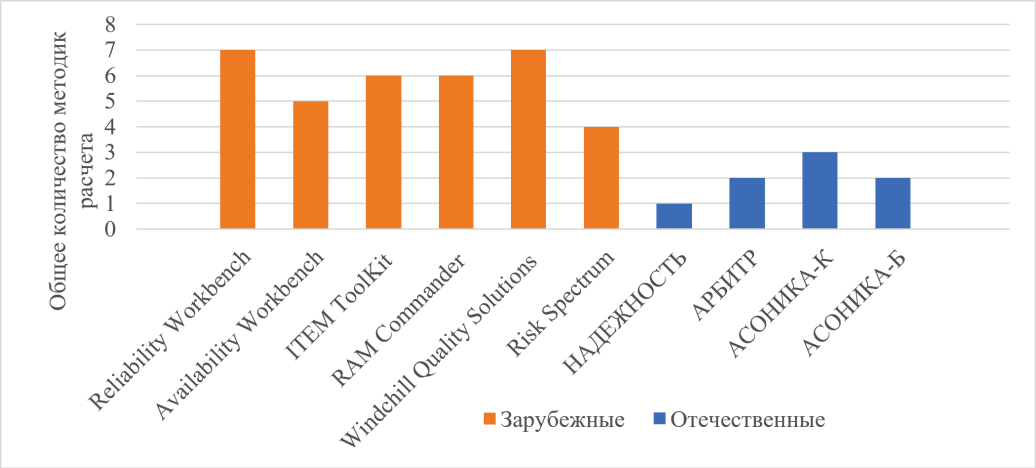


Рис. 1. Количество поддерживаемых методик расчета для различных программных продуктов

граммы должны иметь поддержку со стороны разработчика и быть актуальными на текущий момент. Во-вторых, учитывалась доступность технической документации и описания применения. В-третьих, программные комплексы должны обеспечивать расчеты в соответствии с государственными или международными стандартами, поскольку в инженерной практике результаты расчетов должны быть оформлены и обоснованы со стороны стандартизации.

Поиск в открытых источниках позволил сформировать перечень российских и зарубежных решений.

1. Отечественные программные комплексы.

1.1. ПК *Pragmatica* – разработчик НИЦ «Прикладная Логистика» [5].

1.2. ПК НАДЕЖНОСТЬ – разработчик АО «Цифровая мануфактура» [6].

1.3. ПК АРБИТР (ПК АСМ СЗМА) – разработчик АО «Специализированная инжиниринговая компания Севзапмонтажавтоматика» (АО «СПИК СЗМА») [7].

1.4. ПК АСОНИКА-К – разработчик национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» [8–13].

1.5. ПК АСОНИКА-Б – разработчик ООО «НИИ «АСОНИКА» [14].

2. Зарубежные программные продукты для расчета надежности.

2.1. *Reliability Workbench* – разработчик *Isograph Ltd* (Великобритания) [15].

2.2. *Availability Workbench* – разработчик *Isograph Ltd* (Великобритания) [16].

2.3. *ITEM ToolKit* – разработчик *ITEM Software* (США) [17].

2.4. *RAM Commander* – разработчик *ALD Software Ltd* (Израиль) [18].

2.5. *Windchill Quality Solutions* (ранее *Relex*) – разработчик *PTC Inc* (США) [19; 20].

2.6. *RiskSpectrum* – разработчик *RELCON AB* (Швеция) [21].

2.7. *MADE* – разработчик *PHM Technology* (США) [22].

Результатом рассмотрения программных продуктов стала сводная таблица, на основе которой далее выполняется сравнение. В табл. 1 приведен краткий перечень функциональных возможностей программных продуктов. Сопоставление проводилось по следующим пунктам:

– методики расчета надежности;
– поддерживаемые стандарты;
– поддержка базы компонентов и справочных данных;
– средства обмена данными с другими системами (*CAD/ECAD, PDM/ERP* и т.п.).

Информация по каждому из пунктов определялась согласно документации разработчиков. При этом стоит отметить, что реализация каждого из методов расчета имеет свои особенности в различных программных комплексах (**ПК**). В табл. 1 отражено наличие функций по каждому из пунктов без учета индивидуальных особенностей работы ПК.

На рис. 1 показано сравнение количества поддерживаемых методик расчета надежности в программных комплексах. Данная инфографика дает более наглядное представление о направленности программного продукта.

Таблица 2. Поддержка стандартов в ПК

Название программного продукта	Поддерживаемые стандарты
Pragmatica	Комплекс стандартов серии ГОСТ Р 27.X.XX ГОСТ Р 53392 2017 ГОСТ Р МЭК 61078–2021
Надежность	ГОСТ Р МЭК 61078-2021, Руководство Р-4761, комплекс стандартов серии ГОСТ Р 27.X.XX
Арбитр	ГОСТ 24.701-86, ГОСТ Р МЭК 61508-6, ГОСТ Р МЭК 62502-2014, комплекс стандартов серии ГОСТ Р 27.X.XX
АСОНИКА-К	ГОСТ Р МЭК 61078-2021, ОСТ 4Г0.012.242-84, комплекс стандартов серии ГОСТ Р 27.X.XX
АСОНИКА-Б	ГОСТ Р МЭК 61078-2021, комплекс стандартов серии ГОСТ Р 27.X.XX, ГОСТ Р 70293-2022
Reliability Workbench	*AIAG&VDA, ARP*5580, *BS*5760, *FIDES, GJB* 1391-92, *IEC* 61508, *IEC* 61709, *ISO* 26262, *MIL-STD*-1629*A, SAE J*1739, *N*29500, *ARP* 4761
Availability Workbench	*IEC* 61508, *ISO* 26262, *ARP* 4761
ITEM ToolKit Software	*FIDES, IEC* 61508, *IEC* 61709, *ISO* 26262, *ISO* 9000, *MIL*-1629A, *SN*
RAM Commander	*AIAG & VDA, ARP*5580, *BS* 5760 *Part* 5, *GJB* 1391-92, *SAE J*1739, *MIL-STD*-1629*A*
Windchill Quality Solutions	*HRD*5, *IEC TR* 62380, *SN*29500, *Telcordia, FIDES*
MADE	*MIL-STD*-1629*A, MIL-STD*-882*E, ISO* 26262, *SAE J*1739 *Rev. AUG*2002

В табл. 2 сведена информация о соответствии программных продуктов международным, государственным и отраслевым стандартам. Для отечественных продуктов комплекс стандартов серии ГОСТ Р 27 приведен в сокращенном виде без полного перечисления документов в связи с большим количеством стандартов, входящих в серию. Данная серия стандартов рассматривает общие вопросы надежности в технике и конкретные методики расчета.

Проведенный анализ программных средств для расчета надежности показал, что рынок прикладного ПО в данной области характеризуется выраженной неоднородностью как по функциональному наполнению, так и по нормативной ориентированности. Сопоставление комплексов по критериям поддерживаемых методик, а также по возможностям интеграции со справочными базами данных и обмену данными с *CAD/ECAD/PDM/ERP* позволяет сделать вывод о существенных отличиях в подходах отечественных и зарубежных программных продуктов.

Отечественные программные комплексы в рассматриваемой выборке преимущественно развиваются в узкой отраслевой специфике. Фокус на решении ограниченного набора задач в конкретных областях применения с учетом соответствия национальной нормативной базе и практикам расчета отечественной инженерной школы обеспечивает соответствие типовому регламенту, снижает риск несоответствия требованиям стандартов и упрощает использование ПК в организациях данной сферы.

Зарубежные программные решения, напротив, демонстрируют тенденцию к расширению методического охвата и к построению многофункциональных платформ. В них чаще встречается поддержка широкого набора моделей и процедур анализа: сочетание структурных схем и деревьев событий/неисправностей, развитые инструменты анализа данных отказов, модули для моделирования ремонтопригодности, а также средства интеграции в корпоративные инструменты управления активами и жизненным циклом изделия. В результате зарубежные пакеты, как правило, обеспечивают большую универсальность применения и создают основу для комплексного анализа надежности и риска в единой программной среде.

Таким образом, анализ подтверждает, что выбор программного обеспечения в области

расчета надежности должен рассматриваться как компромисс между нормативной релевантностью, функциональной полнотой и возможностью покупки и поддержки лицензий. Для инженерной практики приоритет часто смещается в сторону соответствия применяемым стандартам и глубины проработки специализированных задач. Для образовательных программ критически важны широта поддерживаемых методик и прозрачность расчетных процедур.

Список литературы

1. Булатов, В.В. Надежность технических систем: учебное пособие / В.В. Булатов. – СПб. : ГУАП, 2021. – 101 с.
2. Ширшиков, А.С. Оценка надежности технических систем: учебное пособие / А.С. Ширшиков, В.В. Лянденбурский, А.М. Белоковыльский. – Пенза : ПГУАС, 2015. – 240 с.
3. Велеулов, З.А. Надежность изделий и систем: учебное пособие / З.А. Велеулов, И.Ю. Кинжагулов, А.В. Федоров, Д.Р. Фирюлин. – СПб. : Университет ИТМО, 2023. – 184 с.
4. Булатов, В.В. Современное состояние учебной дисциплины «Надежность» на основе анализа рабочих программ дисциплин / В.В. Булатов, И.А. Булатова // Инновации в образовании. – 2021. – № 9. – С. 26–35.
5. Прикладная логистика. Программный комплекс управления данными о надежности изделий Pragmatica [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cals.ru/products/pragmatica.
6. Цифровая мануфактура. Программный комплекс «НАДЕЖНОСТЬ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://reliability.manufactory.digital/manual/Reliability/0.01/index.html.
7. СПИК СЗМА. О программе ПК Арбитр [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://szma.com/arbitr/o-programme.
8. Асоника. Документация Асоника-К СИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://asonika-k.ru/docs-si.
9. Асоника. Документация Асоника-К СЧ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://asonika-k.ru/docs-sch.
10. Асоника. Документация Асоника-К ЗИП [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://asonika-k.ru/docs-zip.
11. Асоника. Документация Асоника-К Д [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://asonika-k.ru/docs-d
12. Асоника. Документация Асоника-К РЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://asonika-k.ru/docs-res.
13. Седых, К.В. Подсистема Асоника-К. Часть 1 / К.В. Седых, В.С. Громов // Проблемы науки. – 2016. – № 35(77).
14. Центр компетенций «АСОНИКА». Автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры Асоника-Б [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://asonika-online.ru/products/asonika-b.
15. Isograph. Reliability Workbench [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.isograph.com/software/reliability-workbench.
16. Isograph. Availability Workbench [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.isograph.com/software/availability-workbench.
17. ITEM TOOLKIT Tutorial Version 8.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://itemuk.com/toolkit_2.html.
18. ADL. RAM Commander [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://aldservice.com/reliability-products/rams-software.html.
19. Вященко, Ю.Л. Программное обеспечение в курсах «Эффективность и надежность», «Системные принципы проектирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия»:

практическое пособие / Ю.Л. Вященко, А.С. Афанасьев, А.Г. Никитин. – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2013. – 168 с.

20. PTC. Getting Started Guide Windchill Quality Solutions 10.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://support.ptc.com/WCMS/files/155679/en/WCPDMEssentials.pdf.

21. Manorma, K. RiskSpectrum: Emerging software for Nuclear Power Industry / K. Manorma // 1st International Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), Amman, Jordan. – 2010. – P. 1–6.

22. PHM Technology. MADE [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.phmtechnology.com/made/made-overview.

References

1. Bulatov, V.V. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: uchebnoye posobiye / V.V. Bulatov. – SPb. : GUAP, 2021. – 101 s.

2. Shirshikov, A.S. Otsenka nadezhnosti tekhnicheskikh sistem: uchebnoye posobiye / A.S. Shirshikov, V.V. Lyandenburskiy, A.M. Belokovyl'skiy. – Penza : PGUAS, 2015. – 240 s.

3. Veleulov, Z.A. Nadezhnost' izdeliy i sistem: uchebnoye posobiye / Z.A. Veleulov, I.YU. Kinzhagulov, A.V. Fedorov, D.R. Firyulin. – SPb. : Universitet ITMO, 2023. – 184 s.

4. Bulatov, V.V. Sovremennoye sostoyaniye uchebnoy distsipliny «Nadezhnost'» na osnove analiza rabochikh programm distsiplin / V.V. Bulatov, I.A. Bulatova // Innovatsii v obrazovanii. – 2021. – № 9. – S. 26–35.

5. Prikladnaya logistika. Programmnyy kompleks upravleniya dannymi o nadezhnosti izdeliy Pragmatica [Electronic resource]. – Access mode : https://cals.ru/products/pragmatica.

6. Tsifrovaya manufaktura. Programmnyy kompleks «NADEZHNOST'» [Electronic resource]. – Access mode : https://reliability.manufactory.digital/manual/Reliability/0.01/index.html.

7. SPIK SZMA. O programme PK Arbitr [Electronic resource]. – Access mode : https://szma.com/arbitr/o-programme.

8. Asonika. Dokumentatsiya Asonika-K SI [Electronic resource]. – Access mode : https://asonika-k.ru/docs-si.

9. Asonika. Dokumentatsiya Asonika-K SCH [Electronic resource]. – Access mode : https://asonika-k.ru/docs-sch.

10. Asonika. Dokumentatsiya Asonika-K ZIP [Electronic resource]. – Access mode : https://asonika-k.ru/docs-zip.

11. Asonika. Dokumentatsiya Asonika-K D [Electronic resource]. – Access mode : https://asonika-k.ru/docs-d

12. Asonika. Dokumentatsiya Asonika-K RES [Electronic resource]. – Access mode : https://asonika-k.ru/docs-res.

13. Sedykh, K.V. Podsistema Asonika-K. Chast' 1 / K.V. Sedykh, V.S. Gromov // Problemy nauki. – 2016. – № 35(77).

14. Tsentr kompetentsiy «ASONIKA». Avtomatizirovannaya sistema obespecheniya nadezhnosti i kachestva apparatury Asonika-B [Electronic resource]. – Access mode : https://asonika-online.ru/products/asonika-b.

15. Isograph. Reliability Workbench [Electronic resource]. – Access mode : https://www.isograph.com/software/reliability-workbench.

16. Isograph. Availability Workbench [Electronic resource]. – Access mode : https://www.isograph.com/software/availability-workbench.

17. ITEM TOOLKIT Tutorial Version 8.0 [Electronic resource]. – Access mode : https://itemuk.com/toolkit_2.html.

18. ADL. RAM Commander [Electronic resource]. – Access mode : https://aldservice.com/

reliability-products/rams-software.html.

19. Vyashchenko, YU.L. Programmnoye obespecheniye v kursakh «Effektivnost' i nadezhnost'», «Sistemnyye printsipy proyektirovaniya strelkovo-pushechnogo, artilleriyskogo i raketnogo oruzhiya»: prakticheskoye posobiye / YU.L. Vyashchenko, A.S. Afanas'yev, A.G. Nikitin. – SPb. : Balt. gos. tekhn. un-t, 2013. – 168 s.

20. PTC. Getting Started Guide Windchill Quality Solutions 10.0 [Electronic resource]. – Access mode : https://support.ptc.com/WCMS/files/155679/en/WCPDMEssentials.pdf.

22. PHM Technology. MADE [Electronic resource]. – Access mode : https://www.phmtechnology.com/made/made-overview.

© А.А. Софронов, В.В. Булатов, 2026

УДК 658.528

А.Ю. ТУМАНОВ, Е.В. ИВАНОВ
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМ КАЧЕСТВА И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИИ (2.0–6.0) НАУКОЕМКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: метод Форрестера; системная динамика; устойчивость производства; цифровой двойник; Индустрия 4.0; Индустрия 5.0; Индустрия 6.0; Качество 4.0; *PAF*-модель; СМК.

Аннотация. Целью исследования являлся анализ эволюции моделей и методов качества и разработка на его основе теоретических положений по созданию предиктивных цифровых двойников СМК, обеспечивающих непрерывную адаптивную устойчивость и оптимизацию функциональных издержек наукоемких производств в условиях смены технологических укладов.

Объектом исследования являлись системы менеджмента качества (**СМК**) наукоемких производств, функционирующие в условиях смены технологических укладов и подвергающиеся динамическим воздействиям внешних факторов среды.

Предметом исследования являлись теоретико-методологические принципы, математические модели и инструменты системной динамики, определяющие эволюцию систем качества, а также закономерности предиктивного управления устойчивостью и функциональными издержками.

Введение

Современный этап развития глобального наукоемкого производства и обрабатывающей промышленности характеризуется масштабными структурными сдвигами, вызванными форсированной сменой технологических укладов. На протяжении последних десятилетий системы менеджмента качества (**СМК**) развивались преимущественно в рамках нормативной, регламентной парадигмы, жестко зафиксированной международными и национальными стандартами серии *ISO* 9001 (ГОСТ Р ИСО 9001). Безусловно, данный подход создал прочный фундамент для стандартизации и обеспечения процессного соответствия, однако по своей природе он остался статичным и дискретно-событийным. Традиционные процедуры аудита, карты статистического управления процессами (***SPC***) Шухарта и отчеты о несоответствиях генерируются, аккумулируются и анализируются менеджментом или аудиторами постфактум.

В то же время в условиях реального перехода производственных систем к концепциям Индустрии 4.0 современное наукоемкое предприятие ведет себя не как стабильный, изолированный детерминированный конвейер, а как сложная, стохастическая, нелинейная динамическая система. Ее внутренние параметры связаны множественными перекрестными контурами обратных связей и характеризуются существенными временными задержками. Когда высокотехнологичный участок подвергается резкому внешнему воздействию – реакция системы никогда не бывает мгновенной. Возмущения распространяются по технологической цепочке во времени, формируя временные лаги, из-за чего экономические последствия брака или переналадки проявляются в контуре управленческого учета со значительным опозданием.

Этот разрыв между высокоскоростными процессами производства и запаздывающим управленческим учетом создает научно-практическую проблему, которая не может быть решена в рамках существующих подходов. Для ее преодоления требуется создание принци-

пиально новых динамических моделей СМК, способных осуществлять предиктивный синтез технологических и экономических параметров. Синтез классического аппарата системной динамики Дж. Форрестера с функционально-структурным анализом Йордана – Де Марко, предиктивным нейросетевым моделированием и принципом необходимых и достаточных систем Г.И. Коршунова позволяет сформировать архитектуру динамического цифрового двойника качества.

Для достижения цели исследования была решена следующая задача.

Осуществлен синтез непрерывного аппарата уровней и темпов системной динамики Дж. Форрестера со структурно-функциональными диаграммами Йордана – Де Марко для перевода статичных категорий *PAF*-затрат А. Фейгенбаума в динамические потоковые функции себестоимости.

Литературный обзор и теоретические основы

Историческая траектория формирования экономики качества берет свое начало от фундаментальных трудов Фейгенбаума, предложившего концепцию Всеобщего контроля качества (***TQC***) и ее экономическое ядро – *PAF*-модель (*Prevention*, *Appraisal*, *Failure*) [2]. Фейгенбаум впервые разделил совокупные затраты на качество на три категории: инвестиции в профилактику дефектов (*P*), затраты на оценку и инспекцию (*A*) и прямые потери от внутренних и внешних отказов (*F*). Несмотря на то что *PAF*-модель по сей день остается базовым стандартом финансового учета в СМК, ее классическая реализация полностью лишена временной координаты. Она представляет собой статичный срез затрат. Параллельно с развитием теории качества в Массачусетском технологическом институте (***MIT***) под руководством Форрестера сформировалось принципиально иное научное направление – системная динамика. В своем труде Форрестер доказал, что сложные организационно-технические системы могут быть описаны через системы нелинейных дифференциальных и разностных уравнений, управляющих уровнями (накопителями) и темпами (потоками) [1]. Кибернетический подход Форрестера наглядно продемонстрировал, что такие явления, как колебания объемов производства и усиление спроса, являются прямым следствием внутренней структуры системы и наличия информационных задержек. Тем не менее, обладая мощным математическим аппаратом, ранние модели системной динамики были сфокусированы исключительно на материальной логистике, движении кадров и загрузке оборудования, оставляя переменные СМК, показатели брака и скрытые дефекты за рамками модели.

Первая масштабная и успешная попытка преодолеть этот междисциплинарный разрыв и применить методы Форрестера к анализу Всеобщего управления качеством (***TQM***) была предпринята Стерманом. В своих работах по динамике бизнеса Стерман установил, что процессы СМК нельзя моделировать линейно, так как они тесно переплетены с поведением персонала, износом оборудования и финансовыми ограничениями предприятия [3].

В это же время задача алгоритмизации и строгого описания сложных потоков данных была решена Йорданом и Де Марко в рамках концепции структурного системного анализа (***SADT***) и диаграмм потоков данных (***DFD***) [4]. Методология Йордана – Де Марко дала инженерам строгий синтаксис декомпозиции любых бизнес-процессов. Это заложило алгоритмическую основу для последующего программирования имитационных моделей на электронной вычислительной машине (**ЭВМ**), однако экономическая составляющая в этих схемах по-прежнему требовала динамической адаптации к условиям умного производства.

В современную цифровую эпоху эволюция данных подходов существенно ускорилась под воздействием концепций Индустрии 4.0. Был введен в международный научный оборот термин «Качество 4.0» (*Quality* 4.0), определив его как глубокую интеграцию классического менеджмента качества со сквозными технологиями Четвертой промышленной революции: большими данными, облачными вычислениями и интернетом вещей.

В отечественной научной школе математическое моделирование активных организационно-технических систем получило мощное развитие в работах В.Н. Буркова [5]. Сформированная им теория активных систем позволила учесть влияние человеческого фактора, целеполагания агентов и информационной асимметрии на стабильность производственных процессов.

Одновременно с этим в секторе наукоемкого приборостроения профессор Г.И. Коршунов (**ГУАП**) разработал фундамен-

Таблица 1. Фрагмент эволюции систем качества и методов моделирования в поколениях Индустрии (2.0–6.0)

Поколение Индустрии	Базовая концепция и технологии	Роль и философия качества (СМК)	Метод затрат на качество (Экономика СМК)	Отображение в методе Дж. Форрестера (уровни, потоки, задержки)
Индустрия 2.0 (конец XIX – сер. XX в.)	Конвейер Генри Форда, массовое производство, электрификация	Контроль готовой продукции. Появление ОТК	Метод прямых потерь: брак списывается в чистый убыток	Классическая схема: система реактивна
Индустрия 3.0 (вторая половина XX в.)	Автоматизация, ЧПУ-станки, роботы-манипуляторы, первые ЭВМ	Управление качеством (***TQM***). Появление стандартов ИСО 9001. Качество закладывается в процесс, а не проверяется на выходе	Зарождение *PAF*-модели. Выделяются затраты на предотвращение (*P*) и оценку (*A*). Потери от дефектов (*F*) стремятся снизить	Эра Форрестера Уравнения задержек (***DT***). Любая переналадка конвейера – огромный временной штраф
Индустрия 4.0 (2010-е – по наст. время)	Киберфизические системы, Интернет вещей (***IoT***), аддитивное производство (3D-печать)	Цифровое качество (*Quality* 4.0). Прослеживаемость плат по штрих-кодам. Стандарты ГОСТ Р ИСО 9001 уходят в «цифру»	Динамический *PAF*-анализ: оцифровка скрытых потерь (*F*) в реальном времени. Инновации снижают цену единицы брака	Модификация 4.0: задержки на переналадку при мелкой серии падают до минимума за счет *CAD*-системы
Индустрия 5.0 (середина 2020-х гг.)	Человекоцентричность, устойчивость к шокам (*Resilience*), коботы (роботы-помощники)	Обеспечение результативности. СМК защищает систему от техногенных факторов за счет гибких навыков человека	Оптимизационная *PAF*-модель: поиск точки экстремума (баланса) между ценой профилактики брака и объемом выпуска	Модификация 5.0: введение внешних факторов воздействия (*T* и *I*). Уровни описывают зрелость процессов СМК
Индустрия 6.0 (перспектива 2030+)	Генеративный ИИ, роевые автономные роботы, саморегенерация систем	Автономная превентивность. ИИ корректирует лазерную печать композита за микросекунды до появления брака	Концепция нулевых потерь: исключение затрат на исправление дефектов	Генеративная динамика: система уравнений Форрестера сама переписывает свои коэффициенты в реальном времени под управлением ИИ

тальные инженерные основы управления процессами и инновациями при обеспечении качества сложных приборов и систем [8]. Научная школа Г.И. Коршунова перевела абстрактные требования стандартов ИСО серии 9001 на точный язык технических систем, впервые сформулировав принцип необходимых и достаточных систем как базовый закон построения надежных автоматизированных систем обеспечения устойчивости (**АСОУ**).

В работе [7] была предложена функциональная модель калькуляции себестоимости продукции с использованием принципов Йордана – Де Марко [4].

Ниже представлена табл. 1, охватывающая эволюцию от Индустрии 2.0 до Индустрии 6.0 через призму СМК и математический аппарат Джея Форрестера.

Заключение

1. В ходе исследования теоретически

обосновано, что междисциплинарный синтез классической системной динамики Дж. Форрестера и систем менеджмента качества позволяет полностью преодолеть статичность традиционных подходов СМК. Это трансформирует СМК из пассивного регистратора потерь в предиктивный, непрерывный орган оперативного управления наукоемким производством.

2. Показана эволюция систем качества и методов моделирования в поколениях Индустрии (2.0–6.0).

Список литературы

1. Форрестер, Дж. Основы кибернетики предприятия (Промышленная динамика) / Дж. Форрестер ; пер. с англ. под ред. Д.М. Гвишиани. – М. : Прогресс, 1971. – 340 с.
2. Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции: [сокр. пер. с англ.] / А. Фейгенбаум ; [предисл. А.В. Гличева]. – М. : Экономика, 1986. – 470 с.
3. Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World / J.D. Sterman. – Irwin / McGraw-Hill, 2000. – 993 p.
4. Yourdon, E. Modern Structured Analysis / E. Yourdon. – Englewood Cliffs, N.J. : Yourdon Press, 1989. – X, 672 p.
5. Бурков, В.Н. Введение в теорию активных систем / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков ; Рос. акад. наук, Ин-т проблем упр. – М. : ИПУ, 1996. – 124 с.
6. Иванов, Е.В. Методы улучшения качества производственных процессов при переходе к Индустрии 4.0 / Е.В. Иванов, А.Ю. Туманов // Наука и бизнес: пути развития. – 2024. – № 12(162). – С. 105–108.
7. Туманов, А.Ю. Функциональная модель калькуляции себестоимости продукции в производственной системе предприятия / А.Ю. Туманов, Е.В. Иванов, Д.А. Туманов // Инновации и инвестиции. – 2026. – № 1. – С. 427–431.
8. Коршунов, Г.И. Управление процессами и инновациями при обеспечении качества приборов и систем: учебно-методическое пособие / Г.И. Коршунов. – СПб. : ГУАП, 2008. – 163 с.

References

1. Forrester, Dzh. Osnovy kibernetiki predpriyatiya (Promyshlennaya dinamika) / Dzh. Forrester ; per. s angl. pod red. D.M. Gvishiani. – M. : Progress, 1971. – 340 s.
2. Feygenbaum, A. Kontrol' kachestva produktsii: [sokr. per. s angl.] / A. Feygenbaum ; [predisl. A.V. Glicheva]. – M. : Ekonomika, 1986. – 470 s.
5. Burkov, V.N. Vvedeniye v teoriyu aktivnykh sistem / V.N. Burkov, D.A. Novikov ; Ros. akad. nauk, In-t problem upr. – M. : IPU, 1996. – 124 s.
6. Ivanov, Ye.V. Metody uluchsheniya kachestva proizvodstvennykh protsessov pri perekhode k Industrii 4.0 / Ye.V. Ivanov, A.YU. Tumanov // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2024. – № 12(162). – S. 105–108.
7. Tumanov, A.YU. Funktsional'naya model' kal'kulyatsii sebestoimosti produktsii v proizvodstvennoy sisteme predpriyatiya / A.YU. Tumanov, Ye.V. Ivanov, D.A. Tumanov // Innovatsii i investitsii. – 2026. – № 1. – S. 427–431.
8. Korshunov, G.I. Upravleniye protsessami i innovatsiyami pri obespechenii kachestva priborov i sistem: uchebno-metodicheskoye posobiye / G.I. Korshunov. – SPb. : GUAP, 2008. – 163 s.

© А.Ю. Туманов, Е.В. Иванов, 2026

УДК 004.89

Е.В. ЛЯПУНЦОВА, В.Б. ЧЕЧНЕВ
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

АДАПТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЫБОРА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПЛАНОВ РАБОТ НА МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ключевые слова: адаптивная настройка; альтернативный план; генетический алгоритм; мелкосерийное производство; многокритериальное ранжирование; планирование работ; системы поддержки принятия решений.

Аннотация. Рассматривается адаптивный инструмент формирования и выбора альтернативных планов работ на предприятиях с мелкосерийным производством. Инструмент предназначен для поддержки принятия управленческих решений при распределении трудоемкости между операциями, работниками и календарными периодами. Его вычислительный контур включает генерацию локальных альтернатив на основе генетического алгоритма, фильтрацию недопустимых и структурно близких решений, многокритериальное ранжирование с использованием *ELECTRE* III и *PROMETHEE* II, а также корректировку параметров по результатам расчета и обратной связи лица, принимающего решение.

Введение

Планирование работ на мелкосерийном производстве связано с распределением трудоемкости между неоднородными операциями, исполнителями и календарными периодами. В отличие от массового производства, здесь ниже повторяемость заказов, чаще изменяются сроки и состав работ, а допустимый план должен одновременно учитывать ресурсные, технологические и бюджетные ограничения. Поэтому применение только ручных табличных инструментов или фиксированных правил распределения нагрузки не обеспечивает требуемой оперативности и прозрачности выбора.

Для решения подобной задачи целесообразно использовать систему поддержки принятия решений (**СППР**), в которой лицо, принимающее решение (**ЛПР**), получает несколько допустимых альтернатив, различающихся по стоимости, срокам и равномерности загрузки. Общие принципы построения СППР и ограничения выбора многокритериальных методов рассмотрены в работах [6; 8]. При этом в задачах производственного планирования важно учитывать не только качество одного лучшего решения, но и состав множества вариантов, передаваемых пользователю для сравнения.

Цель статьи состоит в описании адаптивного инструмента формирования и выбора альтернативных планов работ, предназначенного для поддержки принятия управленческих решений при планировании работ на мелкосерийном производстве. В отличие от ранее рассмотренных архитектурных и когнитивно-ориентированных аспектов мультиагентной СППР [7; 8], в статье основное внимание уделено инструментальной реализации вычислительного контура: генерации альтернатив, фильтрации, ранжированию и адаптивной настройке параметров.

Формализация задачи и ограничения

Пусть задано множество операций, множество работников и дискретный горизонт планирования, представленный календарными периодами. Для каждой операции известна трудоемкость, а для каждого работника в каждом периоде – доступный фонд времени и стоимость часа работы. Переменная δ_{irt} задает число часов, назначаемых на выполнение операции i работником r в период t. Для каждой операции должно выполняться балансовое ограничение:

$$\sum_{i\in O}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T}\delta_{irt} = H_i, \quad (1)$$

где H_i – трудоемкость операции i.

Второе базовое ограничение связано с недопустимостью перегрузки работников. Для каждого работника и периода суммарно назначенная нагрузка не должна превышать доступный фонд времени A_{rt}:

$$\sum_{i\in O}\sum_{t\in T}\delta_{irt} \le A_{rt}. \quad (2)$$

Стоимость альтернативного плана определяется суммированием назначенных часов с учетом ставки работника в соответствующем периоде c_{rt}:

$$C(a) = \sum_{i\in O}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T}\delta_{irt}\cdot c_{rt}. \quad (3)$$

Ограничения (1)–(3) задают необходимые рамки задачи планирования работ на мелкосерийном производстве. В прикладной реализации данная модель дополняется проверкой технологической последовательности операций, допустимых периодов выполнения и бюджетных границ по продукту или контракту. Принципиально важно, что ресурсные и технологические ограничения рассматриваются как жесткие. Их нарушение не должно компенсироваться хорошими значениями по срокам или стоимости, поэтому соответствующие варианты исключаются до этапа многокритериального ранжирования.

Содержательно задача относится к классу задач календарно-ресурсного планирования и близка к гибким задачам расписаний, где необходимо учитывать альтернативные ресурсы и несколько критериев качества [4]. Однако в рассматриваемом случае итогом расчета является множество альтернативных планов, предназначенных для управленческого выбора.

Структура адаптивного инструмента формирования и выбора альтернатив

Структура предлагаемого инструмента включает несколько взаимосвязанных этапов вычислительной обработки альтернативных планов.

Первый этап – генерация локальных альтернатив. Для каждой операции формируется популяция вариантов распределения часов между допустимыми работниками и периодами. В качестве базового механизма используется генетический алгоритм, поскольку он позволяет работать с большим пространством дискретных назначений и сохранять несколько конкурентных вариантов [1]. Каждая хромосома кодирует матрицу назначений δ_{irt}; после скрещивания и мутации выполняется ремонт решения, обеспечивающий выполнение балансового ограничения (1). Приспособленность альтернативы рассчитывается как взвешенная оценка трех критериев: близости к целевому бюджету, соответствия срокам и равномерности загрузки. В компактном виде функция оценки задается следующим образом:

$$F(x) = w_B f_B(x) + w_T f_T(x) + w_L f_L(x), \quad (4)$$

где $f_B(x), f_T(x), f_L(x)$ – нормированные оценки по бюджету, срокам и равномерности загрузки; w_B, w_T, w_L – веса критериев. Поскольку веса могут задаваться ЛПР, система позволяет менять приоритеты расчета без изменения структуры алгоритма.

Второй этап – фильтрация недопустимых решений. На нем исключаются альтернативы, нарушающие доступность работников, последовательность операций или заданные границы планового периода. Такой порядок важен для предотвращения ошибочной компенсации: например, низкая стоимость не должна повышать рейтинг варианта, если он приводит к перегрузке исполнителя.

Третий этап – удаление структурно близких альтернатив. Для этого используется локально-чувствительное хеширование (**ЛЧХ**): альтернативы преобразуются в компактные сигнатуры, близкие планы группируются, а из каждой группы сохраняется представитель с лучшими значениями критериев. Данная операция сокращает объем ранжирования и повышает полезность итогового набора для ЛПР, поскольку пользователь получает уникальные варианты выбора финального плана работ.

Четвертый этап – многокритериальное ранжирование. В инструменте используются *ELECTRE* III и *PROMETHEE* II, относящиеся к методам отношения превосходства. Они хорошо согласуются с задачей, где нежелательна полная компенсация критериев [2; 3; 5; 8]. В *PROMETHEE* II итоговая позиция альтернативы определяется по нетто-потоку:

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a), \quad (5)$$

Таблица 1. Сравнение ручного и автоматизированного планирования

Набор	Метод	Время, мин.	Отклонение бюджета, %	Равномерность, %	Перегрузки
S_1	Ручной	122	2,8	92,5	0
S_1	СППР	4	1,0	99,9	0
S_2	Ручной	91	2,1	94,3	0,4
S_2	СППР	3	0,9	97,6	0
S_3	Ручной	55	1,9	82,8	1,2
S_3	СППР	2	1,4	93,6	0

где $\varphi^+(a)$ – положительный поток предпочтения, а $\varphi^-(a)$ – отрицательный поток предпочтения [2]. При использовании *ELECTRE III* дополнительно учитываются пороги безразличия, предпочтения и несогласия, что позволяет более аккуратно работать с близкими по качеству планами [5]. В прикладном режиме ЛПР может выбрать один метод ранжирования или сравнить результаты двух методов.

Адаптивная настройка параметров

Адаптивная часть инструмента предназначена для корректировки параметров вычислительного контура после анализа результатов очередного расчета. В качестве управляемых параметров используются вероятность мутации, сила штрафа за выход за целевые бюджетные границы, интенсивность отбора и порог близости альтернатив при ЛЧХ-фильтрации. Их изменение зависит от диагностических показателей: доли недопустимых решений, числа оставшихся альтернатив, разнообразия топ-набора и отклонения лучших планов от целевых значений.

Если после фильтрации остается слишком мало альтернатив, порог структурной близости может быть ослаблен. Если в топ-наборе много почти одинаковых вариантов, повышается вероятность мутации или меняется механизм отбора. Если значительная часть решений выходит за бюджетные границы, усиливается штраф в функции приспособленности. Такая логика сохраняет управляемость системы: адаптация не заменяет решение ЛПР, а улучшает состав альтернатив, которые предъявляются для выбора.

Отдельное значение имеет обратная связь пользователя. Выбор одного из предложенных планов фиксирует предпочтения ЛПР в конкретном производственном контексте. На последующих расчетах эта информация может использоваться для уточнения весов критериев и параметров фильтрации. В результате инструмент становится настраиваемым контуром формирования вариантов планирования.

Экспериментальная апробация

Для проверки предлагаемого адаптивного инструмента использовались наборы данных, приближенные к задачам планирования работ на мелкосерийном производстве. Они различались числом операций, работников, горизонтом планирования, степенью загрузки доступного фонда времени и неоднородностью доступности работников [8].

Сравнивались ручной режим планирования и режим с использованием разработанной СППР. В качестве показателей применялись время подготовки плана, отклонение от целевого бюджета, равномерность загрузки и среднее число перегрузок работников.

Результаты показывают, что применение предлагаемого инструмента обеспечивает существенное сокращение времени подготовки планов. На крупных и средних наборах выигрыш составил десятки раз, что особенно важно при необходимости оперативного перерасчета. Одновременно улучшились значения оценочных показателей: отклонение от целевого бюджета снизилось, а равномерность загрузки повысилась (табл. 1).

Наиболее важный производственный результат состоит в устранении перегрузок ра-

ботников в автоматизированных планах. Это подтверждает корректность выбранной схемы: сначала исключаются недопустимые варианты, затем оставшиеся альтернативы ранжируются по совокупности критериев. Оценка адаптивной настройки также показала рост структурного разнообразия топ-15 альтернатив на 22,03–48,26 %. Следовательно, ЛПР получает несколько структурно разнообразных планов.

Заключение

Предложен адаптивный инструмент формирования и выбора альтернативных планов работ на мелкосерийном производстве. Инструмент объединяет алгоритмические процедуры генерации локальных альтернатив, фильтрации недопустимых и структурно близких решений, многокритериального ранжирования с использованием *ELECTRE III* и *PROMETHEE II* и адаптивной настройки параметров вычислительного контура.

Основное преимущество подхода состоит в подготовке ранжированного значимого множества альтернатив для ЛПР. Жесткие ограничения проверяются до ранжирования, поэтому перегрузки работников не компенсируются значениями других критериев. Адаптивная настройка улучшает состав итогового множества, повышая разнообразие вариантов и снижая риск предъявления ЛПР однотипных планов.

Экспериментальная апробация подтвердила сокращение времени планирования, снижение отклонения от бюджета, повышение равномерности загрузки и устранение перегрузок работников. Полученные результаты позволяют рассматривать предложенный инструмент как основу алгоритмического контура СППР для задач планирования работ на предприятиях с мелкосерийным производством.

Список литературы

1. Borgonjon, T. A genetic algorithm for the personnel task rescheduling problem with time preemption / T. Borgonjon, B. Maenhout // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 238.

2. Brans, J.P. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method / J.P. Brans, Ph. Vincke, B. Mareschal // European Journal of Operational Research. – 1986. – Vol. 24. – No. 2. – P. 228–238.

3. Cinelli, M. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system / M. Cinelli, M. Kadziński, G. Miebs, M. Gonzalez, R. Słowiński // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 302. – P. 633–651.

4. Dauzère-Pérès, S. The flexible job shop scheduling problem: A review / S. Dauzère-Pérès, J. Ding, L. Shen, K. Tamssaouet // European Journal of Operational Research. – 2024. – Vol. 314. – No. 2. – P. 409–432.

5. Figueira, J.R. ELECTRE methods / J.R. Figueira, V. Mousseau, B. Roy // Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. – New York : Springer, 2005. – P. 133–153.

6. Ларичев, О.И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития / О.И. Ларичев, А.Б. Петровский // Итоги науки и техники. Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. – 1987. – Т. 21. – С. 131–164.

7. Ляпунцова, Е.В. Разработка архитектуры мультиагентной системы принятия решений с использованием когнитивного подхода / Е.В. Ляпунцова, В.Б. Чечнев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 128–135.

8. Чечнев, В.Б. Методы когнитивного моделирования и гибридные эволюционно-многокритериальные алгоритмы в мультиагентной информационно-аналитической системе / В.Б. Чечнев // Электронные библиотеки. – 2026. – Т. 29. – № 1. – С. 368–384.

References

6. Larichev, O.I. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy ikh razvitiya / O.I. Larichev, A.B. Petrovskiy // Itogi nauki i tekhniki. Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika. – 1987. – T. 21. – S. 131–164.

7. Lyapuntsova, Ye.V. Razrabotka arkhitektury mul'tiagentnoy sistemy prinyatiya resheniy s ispol'zovaniyem kognitivnogo podkhoda / Ye.V. Lyapuntsova, V.B. Chechnev // Izvestiya Tul'skogo

gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2025. – № 12. – S. 128–135.

8. Chechnev, V.B. Metody kognitivnogo modelirovaniya i gibridnyye evolyutsionno-mnogokriterial'nyye algoritmy v mul'tiagentnoy informatsionno-analiticheskoy sisteme / V.B. Chechnev // Elektronnyye biblioteki. – 2026. – T. 29. – № 1. – S. 368–384.

© Е.В. Ляпунцова, В.Б. Чечнев, 2026

Раздел: Математические и инструментальные методы экономики

УДК 330.43: 519.86

К.С. ЩЕКОТОВА, Е.П. РОСТОВА
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЙ МОДЕЛИ ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ключевые слова: асимметрия информации; бескоалиционные игры; институциональное сопротивление; модели агентских отношений; модель «Администрация» – «ППС»; цифровая образовательная среда; эффективность программного обеспечения; функция полезности игрока.

Аннотация. Современный этап развития высшего образования характеризуется масштабной цифровизацией и формированием комплексных образовательных экосред, в которых существенная роль отводится программному обеспечению и своевременности его адаптации под требования внешней среды.

В статье процесс внедрения программного обеспечения рассмотрен в условиях институционального сопротивления. Для формализации анализируемого процесса авторами предложена теоретико-игровая модель. Она представляет собой бескоалиционную игру двух лиц с ненулевой суммой в условиях полной, но несовершенной информации. В качестве игроков рассмотрено взаимодействие между «Администрацией» и «ППС» вуза.

Цель публикации состоит в определении оптимального поведения участников цифровой образовательной среды вуза для достижения компромисса в условиях конфликта интересов.

Задачами исследования являются изучение подходов к моделированию различных ситуаций оценки эффективности программного обеспечения в вузе, а также анализ возможных стратегий поведения различных игроков для конкретной игровой ситуации и формирование моделей целевых предпочтений игроков.

Авторская гипотеза: эконометрическое моделирование различных конфликтных ситуаций с использованием аппарата теории игр является эффективным инструментом оценки возможностей возникновения институционального сопротивления.

Метод исследования – метод моделирования и аппарата теории игр.

Достигнутые результаты: предложена модель внедрения программного обеспечения в условиях институционального сопротивления для двух игроков «Администрация вуза» – «ППС».

Предложенная модель обеспечивает повышение обоснованности управленческих решений при оценке и выборе программного обеспечения в цифровой образовательной среде вуза в условиях информационной асимметрии.

Введение

Переход от статического анализа структуры ИТ-инвестиций к оценке их фактической отдачи требует моделирования поведения конечных пользователей программного обеспечения. В статье рассматривается цифровая образовательная среда, в которой наличие конкретного программного обеспечения обосновано потребностями агентов, то есть отдельных групп заинтересованных лиц, которые взаимодействуют в этой среде.

Экономическая эффективность цифровой образовательной среды (**ЦОС**) вуза оценивается интенсивностью и корректностью практического использования конкретного программного обеспечения и уровнем его эксплуатации профессорско-преподавательским составом (**ППС**).

Отметим, что обновление программного обеспечения (**ПО**) в ЦОС вуза почти всегда провоцирует жесткие институциональные

конфликты. Это происходит потому, что цифровизация перераспределяет нагрузку, ломает привычные рабочие процессы и усиливает контроль над сотрудниками.

Также одной из причин возникновения институциональных сопротивлений является наличие информационной асимметрии.

Институциональные конфликты и информационная асимметрия связаны напрямую: информационная асимметрия является главным катализатором, ресурсом и следствием институциональных конфликтов. В контексте вуза и совершенствования программного обеспечения (например, для *LMS Moodle*) эта связь проявляется через дисбаланс знаний, скрытые мотивы и манипуляцию данными.

Асимметрия может быть рассмотрена как причина конфликта. Тогда можно констатировать, что конфликт возникает из-за того, что одна сторона знает о реальном положении дел больше, чем другая, и использует это в своих интересах. Например, рассмотрим кейс «разработка открытых онлайн-курсов». В нем явно выделяется конфликт между Администрацией и ППС. Так как преподаватель знает реальное количество времени и сил, которое ему необходимо затратить на разработку курса, а Администрация этого не знает и оценивает работы лишь по факту наличия контента и тестов. Конфликтная ситуация развивается следующим образом: Администрация делегирует жесткие сроки выполнения задания, а преподаватели, понимая нереальность временных рамок, «уходят» в саботаж.

Теоретический и методологический базис исследования

Применение аппарата теории игр в современных изысканиях достаточно востребовано. В частности, в данном исследовании применялся метод бескоалиционной игры.

Бескоалиционные игры предполагают, что участники действуют независимо, стремясь максимизировать личную выгоду, а их главная цель – равновесие Нэша [1].

В работе Л.Р. Билялова, З.З. Ситшаева, Д.Д. Гельфанова [2] была рассмотрена биматричная бескоалиционная игра и показана экономико-математическая модель для выбора поведенческих стратегий, позволяющих получить участникам оптимальную прибыль.

Публикация [3] показывает, что эффективность деятельности любой организации может быть повышена за счет внедрения нового программного обеспечения, включающего в себя методы искусственного интеллекта.

В работе А.А. Гудкова [4] эта идея получила развитие. Им сделан акцент на прогнозирование эффективности проектной деятельности на основе интеграции подходов бизнес-аналитики и машинного обучения. В настоящее время эта идея продолжает активно внедряться и в сферу программного обеспечения ЦОС.

Соглашаясь с выводами А.А. Гудкова и Л.В. Глуховой о необходимости соблюдения согласованного взаимодействия действий команды исполнителей проекта [5], добавим в этой статье собственный результат моделирования, позволяющий снизить информационную асимметрию. Это возможно за счет обоснованного выбора чистой стратегии каждого игрока.

Следует подчеркнуть, что в работах [6; 7] показаны результаты, отражающие эффективность принимаемых решений на основе аппарата теории игр. Например, Ю.С. Мунирова и Е.П. Ростова [7] предлагают новый инструмент стимулирования ППС вуза, продвигающего свои инновационные и высокотехнологичные решения в ЦОС.

Опираясь на выводы Д.А. Новикова [8], И.М. Прудникова [9], Л.Е. Филякова [10], авторы предлагаемой публикации, изучив роль программного обеспечения в цифровой образовательной среде вуза, сделали заключение о целесообразности интеграции генеративного искусственного интеллекта (**ИИ**) в программное обеспечение электронной информационно-образовательной среды (**ЭИОС**) [11]. Это позволяет перейти от статического хранения информации к динамическому перераспределению ресурсов и созданию персонализированных цифровых помощников, в частности к развитию индивидуальных образовательных траекторий обучающихся, опирающихся на их уровень знания.

Чтобы снизить влияние асимметрии информации и риска развития институционального сопротивления, далее показано возможное практическое решение.

Предложена модель, которая представляет собой бескоалиционную игру двух лиц с ненулевой суммой в условиях полной, но несовершенной информации.

Моделирование внедрения программного обеспечения в условиях институционального сопротивления

В рамках моделируемой системы выделим двух ключевых агентов (игроков).

1. Игрок 1 – Администрация вуза (Ректорат / ИТ-дирекция), обозначаемый индексом *A*. Он стремится максимизировать показатели «цифровой зрелости» университета и снизить транзакционные издержки управления за счет глубокой автоматизации процессов при минимизации общих расходов.

2. Игрок 2 – профессорско-преподавательский состав (**ППС**), обозначаемый индексом *P*. В модели он рассматривается как агрегированный рациональный агент, стремящийся минимизировать собственные краткосрочные трудозатраты и когнитивную нагрузку.

Сформулируем пространства чистых стратегий для каждого игрока.

Стратегическое пространство Администрации (1):

$$S_A = \{A_1; A_2\}, \quad (1)$$

где A_1 (жесткое внедрение) – директивный ввод ПО в эксплуатацию приказом без выделения дополнительного финансирования на мотивацию персонала; A_2 (стимулирующее внедрение) – ввод ПО в эксплуатацию с одновременным созданием фонда материального поощрения (эффективных контрактов, надбавок) за качественное наполнение среды и достижение *KPI* цифровой зрелости.

Стратегическое пространство ППС (2):

$$S_P = \{P_1; P_2\}, \quad (2)$$

где P_1 (Кооперация / Активная адаптация) – добросовестное освоение интерфейса ПО, генерация качественного цифрового контента, перенос рабочей программы дисциплины (**РПД**) и оценочных средств в *LMS*; P_2 (Отказ / Пассивный саботаж) – формальное использование софта, дублирование процессов на бумажных носителях, игнорирование функционала системы, ведущее к генерации недостоверных данных и сбоям в управленческом контуре.

Для построения платежной матрицы игры введем следующую систему экономических параметров: V – совокупный синергетический социально-экономический эффект вуза от полноценного функционирования ПО ЦОС (достижение показателей цифровой зрелости, рост рейтинга, удержание подушевого финансирования за счет снижения отсева студентов); K – капитальные затраты (***CAPEX***) на создание/покупку и первичное развертывание ПО; ΔR – объем финансовых ресурсов, выделяемых администрацией на материальное стимулирование ППС при выборе стратегии A_2 ($\Delta R > 0$); ΔE_{time} – денежный эквивалент высвобождаемого времени ППС в долгосрочной перспективе за счет автоматизации рутинных операций (проверка тестов, автоматическое формирование ведомостей); E_{cost} – альтернативная стоимость краткосрочных трудозатрат и когнитивных усилий ППС на переобучение и адаптацию методических материалов к требованиям нового ПО ($E_{cost} > \Delta E_{time}$) в краткосрочном периоде, что и порождает мотив для саботажа; D – административные санкции (репутационные и депремиальные потери), накладываемые на ППС в случае выявления саботажа при жестком контроле со стороны администрации.

Моделирование функций полезности игроков

Составим функции полезности игроков (U_A, U_P) для каждого из четырех возможных профилей стратегий.

1. Профиль (A_1, P_1) – жесткое внедрение при кооперации персонала: Администрация получает полный эффект V, не неся расходов на стимулирование. ППС несет издержки на освоение системы, частично компенсируемые будущей экономией времени (3, 4):

$$U_A(A_1, P_1) = V - K; \quad (3)$$

$$U_P(A_1, P_1) = \Delta E_{time} - E_{cost}. \quad (4)$$

2. Профиль (A_1, P_2) – жесткое внедрение и пассивный саботаж: полезный эффект V не достигается ($V = 0$). Администрация несет убытки в размере стоимости программного обеспечения. К ППС предъявляются административные взыскания D, при этом реальные трудозатраты на освоение программного обеспечения равны 0 (5):

$$U_A(A_1, P_2) = -K. \quad (5)$$

3. Профиль (A_2, P_1) – стимулирующее вне-

Таблица 1. Матрица выигрышей теоретико-игровой модели для внедрения программного обеспечения в ЦОС вуза

Администрация (A) / ППС (P)	Кооперация (P_1)	Саботаж (P_2)
Жесткое внедрение (A_1)	$(V - K; \Delta E_{time} - E_{cost})$	$(-K; -D)$
Стимулирование (A_2)	$V - K - \Delta R; \Delta E_{time} - E_{cost} + \Delta R)$	$(-K; -D)$

дрение при кооперации персонала: Администрация получает эффект V, но несет дополнительные затраты на фонд стимулирования ΔR. ППС полностью компенсирует свои затраты за счет надбавок (6, 7):

$$U_A(A_2, P_1) = V - K - \Delta R; \quad (6)$$

$$U_P(A_2, P_1) = \Delta E_{time} - E_{cost} + \Delta R. \quad (7)$$

4. Профиль (A_2, P_2) – стимулирующее внедрение при саботаже персонала: поскольку ППС выбирает саботаж, критерии выплаты стимулов не выполняются, фонд ΔR не расходуется. Ситуация эквивалентна профилю (A_1, P_2) (8, 9):

$$U_A(A_2, P_2) = -K; \quad (8)$$

$$U_P(A_2, P_2) = -D. \quad (9)$$

Представим смоделированную игру в нормальной (матричной) форме (табл. 1).

Проведем анализ чистых стратегий игроков на основе доминирования.

Теорема (об условии саботажа в чистых стратегиях). Если величина административного наказания ниже чистых краткосрочных издержек преподавателя на освоение системы ($D < \Delta E_{time} - E_{cost}$), то стратегия саботажа P_2 является строго доминирующей для Игрока 2 как при жестком, так и при стимулирующем внедрении софта.

Доказательство: сравним выигрыши ППС при выборе P_1 и P_2.

При стратегии A_1: $\Delta E_{time} - E_{cost} < -D \Leftrightarrow D < E_{cost} - \Delta E_{time}$.

При стратегии A_2 (в случае, если стимул недостаточен: $\Delta R < E_{cost} - \Delta E_{time} - D$): выигрыш от кооперации все еще меньше выигрыша от саботажа.

Следовательно, при слабых административных институтах и отсутствии адекватной мотивации игра имеет единственное равновесие Нэша в чистых стратегиях – профиль (A_1, P_2), при котором ПО ЦОС экономически неэффективно, а чистый убыток вуза равен – K.

Для нахождения условий эффективного функционирования среды перейдем к анализу игры в смешанных стратегиях.

Пусть Администрация выбирает стратегию стимулирования A_2 с вероятностью p, а стратегию A_1 – с вероятностью $(1 - p)$.

ППС выбирает стратегию кооперации P_1 с вероятностью q, а стратегию саботажа P_2 – с вероятностью $(1 - q)$.

Определим математическое ожидание выигрыша ППС (10):

$$E(U_P) = p \cdot [q(\Delta E_{time} - E_{cost} + \Delta R) + (1 - q)(-D)] + (1 - p) \cdot [q(\Delta E_{time} - E_{cost}) + (1 - q)(-D)]. \quad (10)$$

Упрощая выражение, находим точку безразличия ППС, которая определяет пороговую вероятность стимулирования со стороны администрации (11):

$$\frac{dE(U_P)}{dq} = \Delta E_{time} - E_{cost} + p \cdot \Delta R + D = 0. \quad (11)$$

Оттуда получаем критическую вероятность применения администрацией стимулирующих мер p^* (12):

$$p^* = \frac{E_{cost} - \Delta E_{time} - D}{\Delta R}. \quad (12)$$

Аналогично определим математическое ожидание выигрыша Администрации ($E(U_A)$) и найдем критическую вероятность кооперации персонала q^*, при которой инвестиции в ПО

выходят на уровень безубыточности (13):

$$E(U_A) = q \cdot [p(V - K - \Delta R) + (1 - p)(V - K)] + (1 - q)(-K). \quad (13)$$

Поскольку Администрация всегда несет издержки на стимулы при кооперации, равновесие в смешанных стратегиях существует, когда размер необходимого фонда материального поощрения ΔR^* жестко сбалансирован с предельным объемом штрафных санкций и транзакционных издержек. Из уравнения для p^* (при условии $p = 1$, то есть гарантированном переходе к стратегии A_2) выведем формулу минимально необходимого экономического стимула (14):

$$\Delta R^* = E_{cost} - \Delta E_{time} - D. \quad (14)$$

Обсуждение и выводы

Полученное аналитическое решение (14) позволяет сформулировать ключевой вывод для методики оценки эффективности ПО ЦОС.

Эффективность программного обеспечения является функцией не только его технических параметров, но и институциональных условий его внедрения.

Фактический показатель чистого дисконтированного дохода (***NPV***) внедряемой цифровой среды должен рассчитываться с обязательным учетом затрат на преодоление сопротивления персонала (15):

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{q \cdot V - (S_t + p \cdot \Delta R)}{(1+r)^t} - K. \quad (15)$$

Если вуз игнорирует величину ΔR^*, вероятность кооперации $q \to 0$, и проект автоматизации оборачивается чистым технологическим убытком.

Вывод

Разработанная модель позволяет рассчитать точную нижнюю границу бюджета сопровождения ПО, переводящую цифровую образовательную среду университета в точку устойчивого и эффективного равновесия Нэша.

Список литературы

1. Nash, J.F. Two-person cooperative games / J.F. Nash // Econometrics. – 1953. – Vol. 21. – P. 128–140.
2. Билялова, Л.Р. Применение игрового подхода к математическому моделированию и анализу поведения участников экономического рынка / Л.Р. Билялова, З.З. Ситшаева, Д.Д. Гельфанова // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2020. – № 1(67). – С. 65–69.
3. Богомолова, И.П. Управление эффективностью деятельности организации на основе внедрения инновационного программного обеспечения / И.П. Богомолова, Е.И. Кривенко, Е.А. Малюкова // Инновационная наука. – 2023. – № 2-2. – С. 54–55.
4. Гудков, А.А. Прогнозирование эффективности проектной деятельности на основе интеграции подходов бизнес-аналитики и машинного обучения // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2024. – Т. 2. – № 1(53). – С. 27–36.
5. Гудков, А.А. Модель согласованного взаимодействия команды IT-проекта и его экономических последствий / А.А. Гудков, Л.В. Глухова // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 12(174). – С. 134–138.
6. Моргенштерн, О. Теория игр и экономическое поведение / О. Моргенштерн, Дж. фон Нейман. – М. : Книга по Требованию, 2012. – 708 с.
7. Мунирова, Ю.С. Моделирование системы управления стимулированием научно-педагогических работников вуза / Ю.С. Мунирова, Е.П. Ростова // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. – 2025. – Т. 20. – № 1. – С. 28–41.
8. Новиков, Д.А. Иерархические активные системы: модели и механизмы управления / Д.А. Новиков. – М. : Издательство физико-математической литературы, 2022. – 352 с.
9. Прудников, И.М. Новый подход к поиску точек равновесия в экономике и теории игр / И.М. Прудников // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2019. – № 20-2. – С. 107–119.
10. Филяков, Л.Е. Факторы роста эффективности компаний в сфере разработки программного

обеспечения на фоне технологических сдвигов / Л.Е. Филяков // Финансовые рынки и банки. – 2026. – № 4. – С. 186–188.

11. Щекотова, К.С. Роль программного обеспечения в деятельности электронной информационно-образовательной среды вуза / К.С. Щекотова // Матрица научного познания. – 2026. – № 6-2. – С. 122–129.

References

2. Bilyalova, L.R. Primeneniye igrovogo podkhoda k matematicheskomu modelirovaniyu i analizu povedeniya uchastnikov ekonomicheskogo rynka / L.R. Bilyalova, Z.Z. Sitshayeva, D.D. Gel'fanova // Uchenyye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. – 2020. – № 1(67). – S. 65–69.

3. Bogomolova, I.P. Upravleniye effektivnost'yu deyatel'nosti organizatsii na osnove vnedreniya innovatsionnogo programmnogo obespecheniya / I.P. Bogomolova, Ye.I. Krivenko, Ye.A. Malyukova // Innovatsionnaya nauka. – 2023. – № 2-2. – S. 54–55.

4. Gudkov, A.A. Prognozirovaniye effektivnosti proyektnoy deyatel'nosti na osnove integratsii podkhodov biznes-analitiki i mashinnogo obucheniya // Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva. – 2024. – T. 2. – № 1(53). – S. 27–36.

5. Gudkov, A.A. Model' soglasovannogo vzaimodeystviya komandy IT-proyekta i yego ekonomicheskikh posledstviy / A.A. Gudkov, L.V. Glukhova // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 12(174). – S. 134–138.

6. Morgenshtern, O. Teoriya igr i ekonomicheskoye povedeniye / O. Morgenshtern, Dzh. fon Neyman. – M. : Kniga po Trebovaniyu, 2012. – 708 s.

7. Munirova, YU.S. Modelirovaniye sistemy upravleniya stimulirovaniyem nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov vuza / YU.S. Munirova, Ye.P. Rostova // Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2025. – T. 20. – № 1. – S. 28–41.

8. Novikov, D.A. Iyerarkhicheskiye aktivnyye sistemy: modeli i mekhanizmy upravleniya / D.A. Novikov. – M. : Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 2022. – 352 s.

9. Prudnikov, I.M. Novyy podkhod k poisku tochek ravnovesiya v ekonomike i teorii igr / I.M. Prudnikov // Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya. – 2019. – № 20-2. – S. 107–119.

10. Filyakov, L.Ye. Faktory rosta effektivnosti kompaniy v sfere razrabotki programmnogo obespecheniya na fone tekhnologicheskikh sdvigov / L.Ye. Filyakov // Finansovyye rynki i banki. – 2026. – № 4. – S. 186–188.

11. Shchekotova, K.S. Rol' programmnogo obespecheniya v deyatel'nosti elektronnoy informatsionno-obrazovatel'noy sredy vuza / K.S. Shchekotova // Matritsa nauchnogo poznaniya. – 2026. – № 6-2. – S. 122–129.

© К.С. Щекотова, Е.П. Ростова, 2026

УДК 004.9

Д.Д. ЯРЦЕВ
ФГБНУ «Росинформагротех», г.о. Пушкинский

НЕЧЕТКИЙ ПРИРОДОПОДОБНЫЙ МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЮДЖЕТА МЕЖДУ КАНАЛАМИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ СОИСКАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: природоподобный алгоритм; распределение бюджета на привлечение соискателей; теория нечетких множеств; условная оптимизация; *Crow search algorithm*.

Аннотация. Использование портфельного подхода при организации основной деятельности требует применения массового рекрутинга персонала для кадрового обеспечения реализации проектов. Важным этапом такого вида рекрутинга является поиск и привлечение соискателей на множество открытых вакансий. Целью статьи является разработка метода распределения выделяемых на поиск специалистов денежных средств между каналами привлечения, учитывающего особенности массового рекрутинга и совокупность ресурсных ограничений. Для ее достижения выполнен анализ методов условной многомерной оптимизации, по результатам которого выбран природоподобный метод *Crow search algorithm*, моделирующий пищедобывательное поведение ворон в части формирования запасов, и предложена его модификация путем введения элементов теории нечетких множеств для учета информационных дефектов и повышения скорости сходимости оптимизационного алгоритма. Применение нечеткого логического вывода для расчета свободных параметров метода позволит быстрее находить баланс между локальным и глобальным поиском и останавливаться на приемлемом решении с учетом всех ограничений, а использование операций над нечеткими множествами, задающими оценки конверсии в воронке найма, – учитывать недостаток информации о каналах привлечения.

Вывод

На сегодняшний день многие организации осуществляют основную деятельность в рамках портфельного подхода, заключающегося в одновременной реализации множества разнообразных проектов. Использование такого подхода требует особой организации кадрового обеспечения, поскольку каждый проект предъявляет уникальные требования к навыкам и компетенциям членов его команды. Для разрешения данной проблемы может использоваться массовый рекрутинг, заключающийся в подборе большого числа специалистов на линейные позиции в команде [1].

Важным этапом массового подбора является поиск и привлечение соискателей, среди которых в последующем будет осуществляться отбор специалистов на открытые в портфеле проектов вакансии [2]. Ввиду огромного числа типов каналов (*job*-сайты, доски объявлений, агрегаторы, форумы, каналы в мессенджерах, *VK*-сервисы, профессиональные сообщества и т.п.) и примеров в каждом из них особую актуальность приобретает задача распределения выделяемого на поиск специалистов бюджета между каналами привлечения соискателей. Сложность данной задаче добавляет недостаток достоверной статистической информации о каналах, которая необходима для расчета метрик, оценивающих эффективность найма. Данные обстоятельства подтверждают научную значимость разработки метода поддержки принятия по бюджетному планированию массового рекрутинга персонала для реализации портфеля проектов, выполняемого в условиях ограниченного информационного обеспечения.

Постановка задачи распределения бюджета между каналами привлечения соискателей

Содержательная постановка задачи распределения бюджета на привлечение специалистов

заключается в выделении денежных средств различным каналам, на которых будет осуществляться поиск соискателей для закрытия вакансий в проектных командах, с учетом совокупности ресурсных ограничений и требований массового рекрутинга.

Математическая постановка задачи выглядит следующим образом. Для реализации портфеля проектов открыто множество вакансий в их командах:

$$\boldsymbol{V}^* = \{v_j^*\},\ \boldsymbol{V}^* \to \boldsymbol{Q}^*,\ \ \boldsymbol{Q}^* = \{q_j^*\},\ j = \overline{1,J},$$

где $\boldsymbol{V}^*$ – множество вакансий; $\boldsymbol{Q}^*$ – множество, отражающее потребности по вакансиям; v_j^* – j-я вакансия; q_j^* – потребность по j-й вакансии (число необходимых специалистов); J – число вакансий.

Поиск соискателей для закрытия вакансий выполняется во множестве каналов привлечения:

$$\boldsymbol{E} = \{\boldsymbol{E}_l\},\ \ l = \overline{1,L},\ \ \boldsymbol{E}_l = \{e_{lk}\},\ \ k = \overline{1,K_l},$$

где E – множество типов каналов привлечения соискателей; E_l – множество вариантов каналов l-го типа; e_{lk} – k-й вариант канала l-го типа; K_l – число вариантов каналов l-го типа; L – число типов каналов.

Каждый вариант канала характеризуется набором показателей, отражающих затраты (стоимость клика (*Cost per Click*), контакта (*Cost per Lead*) или найма (*Cost per Hire*)), эффективность воронки найма (показатели конверсии в воронке найма), время на закрытие вакансии (*Time-to-Hire*).

Требуется распределить выделенный на привлечение бюджет между каналами так, чтобы привлечь максимально возможное число соискателей на открытые в портфеле проектов вакансии. Для этого формируется вектор, содержащий объемы денежных средств, выделяемых каждому каналу:

$$\boldsymbol{x} = (x_{1,1,1},\ldots,x_{j,l,k},\ldots,x_{J,L,K_L}),\ \ x_{j,l,k} \ge 0,$$
$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K_l} x_{j,l,k} \le bud,$$

где $x_{j,\,l,\,k}$ – объем денежных средств, выделяемых k-му варианту канала l-го типа для привлечения соискателей j-й вакансии; bud – выделенный бюджет.

Целевая функция основывается на функции Хилла (*Hill function*), успешно применяемой в *Marketing Mix Modeling* и характеризующей зависимость числа привлеченных соискателей от объема вложенных ресурсов. Ее выбор обусловлен тем, что она отражает закон убывающей предельной отдачи: на начальном этапе вложения обеспечивают значительный прирост числа соискателей, однако с увеличением вложений он уменьшается, пока не достигнет предела насыщения (максимально возможного числа соискателей).

С использованием функции Хилла определяется число соискателей для разных вакансий, которое обеспечат выбранные каналы привлечения:

$$q_{j,l,k} = H(x_{j,l,k}) = \frac{q_{j,l,k}^{\max} \cdot x_{j,l,k}^{\alpha_{l,k}}}{\varphi_{j,l,k}^{\alpha_{l,k}} + x_{j,l,k}^{\alpha_{l,k}}},$$
$$\boldsymbol{q} = (q_{1,1,1},\ldots,q_{j,l,k},\ldots,q_{J,L,K_L}),\ \ q_{j,l,k} \ge 0,$$

где $q_{j,\,l,\,k}$ – число соискателей j-й вакансии из k-го варианта канала l-го типа; $q^{max}_{\,j,\,l,\,k}$ – максимальное число соискателей j-й вакансии, которое может дать k-й вариант канала l-го типа; $H()$ – функция Хилла; $\alpha_{l,\,k}$ – коэффициент Хилла, определяющий крутизну кривой в k-м варианте канала l-го типа; $\varphi_{j,\,l,\,k}$ – константа полунасыщения для j-й вакансии в k-м варианте канала l-го типа.

Критерий оптимизации имеет вид:

$$f(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{J}\left(\omega_j \cdot \sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K_l} H(x_{j,l,k})\right) \to \max_{x \in X}, \qquad (1)$$

где ω_j – важность j-й вакансии, задаваемая экспертно; X – множество всех возможных решений.

На область допустимых решений накладываются следующие ограничения.

1. Диапазон допустимых объемов денежных средств, выделяемых каналам привлечения соискателей (в целях снижения рисков зависимости от одного канала):

$$\sum_{j=1}^{J} x_{j,l,k} \in \left[(\zeta_{l,k}^{\min} \cdot bud), (\zeta_{l,k}^{\max} \cdot bud)\right],$$

где $\zeta^{min}_{\,i,\,k}$ и $\zeta^{max}_{\,i,\,k}$ – минимальная и максимальная доли бюджета, который может быть выделен на k-й вариант канала l-го типа.

2. Минимальное число соискателей j-й вакансии, рассчитываемое с учетом показателей

конверсии этапов подбора в воронке найма:

$$\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K_l}\left\lfloor q_{j,l,k}\cdot \Upsilon_{j,l,k}\right\rfloor \geq q_j^*,$$

где $\gamma_{j,\,l,\,k}$ – совокупная конверсия в воронке найма j-й вакансии в k-м варианте канала l-го типа.

Ввиду недостатка достоверной статистической информации о каналах привлечения предлагается показатель, отражающий совокупную конверсию в воронке найма, рассчитывать следующим образом:

$$\Upsilon_{j,l,k} = COG(\tilde{\Upsilon}_{j,l,k}),\ \ \tilde{\Upsilon}_{j,l,k} = \overset{Z}{\underset{z=1}{\otimes}}\tilde{\upsilon}_{j,l,k}^{z},$$

где $\tilde{\upsilon}_{j,l,k}^{z}$ – нечеткое множество, характеризующее конверсию на z-м этапе воронки найма j-й вакансии в k-м варианте канала l-го типа; $\otimes$ – операция перемножения нечетких множеств; Z – число этапов в воронке найма; $\tilde{\Upsilon}_{j,l,k}$ – нечеткое множество, характеризующее совокупную конверсию в воронке найма j-й вакансии в k-м варианте канала l-го типа; $COD()$ – операция нахождения центра тяжести нечеткого множества.

Природоподобный метод распределения бюджета на привлечение соискателей

Поставленная задача относится к условной многомерной оптимизации и характеризуется высокой размерностью и недостатком информационного обеспечения, что существенно ограничивает применение детерминированных методов, проводящих исчерпывающий поиск на всем множестве решений и предоставляющих гарантии получения «строго оптимального» результата. Альтернативой являются природоподобные методы, снимающие указанное ограничение путем введения элемента случайности в поисковый алгоритм [3].

На сегодняшний день разработано свыше 400 алгоритмов, вдохновленных моделями функционирования природных систем, процессов и явлений (естественная эволюция, стратегии выживания животных и растений, социальное поведение человека и т.п.). Ввиду того что не существует универсального метода, о чем говорится в теореме «об отсутствии бесплатных обедов», выбор конкретного определяется особенностями содержательной постановки решаемой задачи оптимизации [4].

Для поставленной задачи выбран *Crow search algorithm*, предложенный *Alireza Askarzadeh* в 2016 г. [5]. Он вдохновлен пищедобывательным поведением ворон в части формирования запасов и моделирует их способности наблюдать друг за другом, запоминать места укрытия и применять обманные маневры для их защиты.

Модифицированный под специфику рассматриваемой задачи *Crow search algorithm* включает следующие этапы.

Задание свободных параметров: T – максимальное число итераций; I – число одновременно исследуемых решений (численность стаи ворон); $\lambda(0)$ – исходное значение длины полета вороны; $\rho(0)$ – исходное значение возможности осознания вороной наблюдения.

Инициализация популяции: формирование множества решений – векторов $\boldsymbol{X} = \{\boldsymbol{x}^i\}, i = \overline{1,I}$, характеризующих исходные варианты распределения бюджета между каналами, выполняется случайным образом, но с проверкой введенных ограничений. Также определяется множество $\boldsymbol{M} = \{\boldsymbol{m}^i\},\ i = \overline{1,I}$, отвечающее за «память» (лучшие позиции): на начальной итерации особи не обладают опытом, поэтому $\boldsymbol{m}^i(0) = \boldsymbol{x}^i(0)$.

Основной цикл отвечает за обновление «памяти» и включает шаги.

1. Генерация новых решений. Случайным образом каждая ворона выбирает другую, за которой будет наблюдать. Перемещение i-й вороны за s-й (причем $i \neq s$) выполняется по правилу:

$$\boldsymbol{x}^i(t+1) = \begin{cases} \boldsymbol{x}^i(t) + rand(0,1)\times\lambda^i(t)\times \\ (\boldsymbol{m}^s(t) - \boldsymbol{x}^i(t)), \\ \text{если } rand(0,1) \geq \rho^s(t), \\ \text{случайная позиция}, \\ \text{в противном случае}, \end{cases}$$

где $\boldsymbol{x}^i(t)$ и $\boldsymbol{x}^i(t+1)$ – позиции i-й вороны на t-й и $(t+1)$-й итерациях соответственно; $rand(0,1)$ – случайное число в $[0,1]$; $\lambda^i(t)$ – длина полета i-й вороны на t-й итерации; $\boldsymbol{m}^s(t)$ – «память» s-й вороны на t-й итерации; $\rho^s(t)$ – возможность осознания s-й вороны наблюдения на t-й итерации.

Для повышения скорости сходимости алгоритма предлагается значения свободных параметров, которые ранее определялись экс-

пертами, рассчитывать с помощью систем нечеткого логического вывода по алгоритму Мамдани. Входами для системы для расчета длины полета вороны будут доля выполненных итераций и величина улучшения «памяти» (прироста функции пригодности), а для оценки возможности осознания вороной наблюдения – доля выполненных итераций и количество итераций без улучшения «памяти». Адаптивная настройка указанных параметров обеспечит динамическую балансировку между этапами глобального (исследование новых областей пространства) и локального (изучение окрестностей лучших позиций) поиска в условиях высокой размерности задачи.

2. Проверка допустимости новых позиций. Если новая позиция удовлетворяет поставленным ограничениям, то она принимается, в противном случае ворона остается на своей позиции.

3. Оценка качества решений: расчет функции пригодности новых позиций по формуле (1) и обновление «памяти» каждой вороны по правилу:

$$\boldsymbol{m}^i(t+1)=\begin{cases}\boldsymbol{x}^i(t+1), \text{ если } f(\boldsymbol{x}^i(t+1))\geq f(\boldsymbol{m}^i(t)),\\ \boldsymbol{m}^i(t), \text{ в противном случае.}\end{cases}$$

4. Проверка условия останова (выполнение заданного числа циклов T или длительное отсутствие прироста эффекта от дополнительных итераций).

Предложенный метод может использоваться *HR*-менеджерами для формирования обоснованных рекомендаций по бюджетному планированию массового рекрутинга персонала.

Заключение

В статье предложен экономико-математический метод распределения денежных средств между каналами привлечения соискателей на открытые в портфеле проектов вакансии, базирующийся на модели формирования запасов стаей ворон, в которую введены элементы теории нечетких множеств для обеспечения адаптивного управления поиском. Его отличительной особенностью является применение функции Хилла для учета нелинейного характера отклика каналов на вложения и обеспечения максимальной отдачи с учетом важности вакансий и совокупной конверсии в воронке найма, представляющей собой центр тяжести произведения нечетких чисел.

Список литературы

1. Тутова, А.С. Применение природовдохновленного метода для формирования проектных команд / А.С. Тутова, Д.Д. Ярцев // Наука и бизнес: пути развития. – 2026. – № 5. – С. 164–168.

2. Тутова, А.С. Применение биоинспирированных методов для автоматизированного рекрутинга проектных команд / А.С. Тутова, Д.Д. Ярцев // Глобальный научный потенциал. – 2026. – Т. 1. – № 5. – С. 277–281.

3. Булыгина, О.В. Конструирование экономико-математических моделей многокритериальной оптимизации на основе гибридных метаэвристик / О.В. Булыгина // Прикладная информатика. – 2025. – Т. 20. – № 3. – С. 66–84.

4. Булыгина, О.В. Нечеткий биоинспирированный метод формирования набора кандидатов на линейные должности / О.В. Булыгина, Д.Д. Ярцев, Н.С. Кулясов, М.Ю. Воротилова // Прикладная информатика. – 2025. – Т. 20. – № 2. – С. 4–23.

5. Askarzadeh, A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm / A. Askarzadeh // Computers and Structures. – 2016. – Vol. 169. – P. 1–12.

References

1. Tutova, A.S. Primeneniye prirodovdokhnovlennogo metoda dlya formirovaniya proyektnykh komand / A.S. Tutova, D.D. Yartsev // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2026. – № 5. – S. 164–168.

2. Tutova, A.S. Primeneniye bioinspirirovannykh metodov dlya avtomatizirovannogo rekrutinga proyektnykh komand / A.S. Tutova, D.D. Yartsev // Global'nyy nauchnyy potentsial. – 2026. – T. 1. – № 5. – S. 277–281.

3. Bulygina, O.V. Konstruirovaniye ekonomiko-matematicheskikh modeley mnogokriterial'noy optimizatsii na osnove gibridnykh metaevristik / O.V. Bulygina // Prikladnaya informatika. – 2025. – T. 20. – № 3. – S. 66–84.
4. Bulygina, O.V. Nechetkiy bioinspirirovannyy metod formirovaniya nabora kandidatov na lineynyye dolzhnosti / O.V. Bulygina, D.D. Yartsev, N.S. Kulyasov, M.YU. Vorotilova // Prikladnaya informatika. – 2025. – T. 20. – № 2. – S. 4–23.

© Д.Д. Ярцев, 2026

УДК 314

Л.В. ГОРШКОВА
ГКОУ ВО «Российская таможенная академия», г. Москва

АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩЬЮ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ: РЕГИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Ключевые слова: обеспеченность медицинской помощью; регионы России; региональное здравоохранение; ресурсное обеспечение; эффективность здравоохранения.

Аннотация. Актуальность исследования обеспеченности медицинской помощью населения обусловлена ростом доли пожилого населения, увеличивающим нагрузку на систему здравоохранения, существенной дифференциацией доступности медицинской помощи в зависимости от территории, нехваткой врачей и среднего медицинского персонала, особенно в первичном звене и сельской местности. Обеспеченность медицинской помощью напрямую определяет своевременность диагностики, эффективность лечения и, как следствие, показатели здоровья населения (заболеваемость, инвалидность, смертность). Целью исследования является анализ ресурсного обеспечения организаций здравоохранения регионов России и на его основе определение доступности медицинской помощи. Задачи: выявить тенденции ресурсного обеспечения системы здравоохранения в среднем по России и в разрезе регионов; оценить влияние факторов на доступность медицинской помощи. Гипотеза исследования: выявление наиболее существенных факторов, влияющих на обеспеченность ресурсами системы здравоохранения. Использованные методы: сравнительный и корреляционный анализ. По итогам исследования определены факторы, наиболее существенно влияющие на доступность медицинской помощи.

Уровень доступности медицинской помощи сильно различается между субъектами РФ. На это влияет целый комплекс факторов: уровень финансирования здравоохранения, демографическая ситуация, климатические и географические особенности, концентрация научных и медицинских центров.

Обеспеченность населения медицинской помощью в регионах России изучали разные организации и группы исследователей. Рязанский государственный медицинский университет и Федеральный научно-исследовательский институт организации здравоохранения и информатизации изучали связь кадровой обеспеченности медицинских организаций и заболеваемости населения на примере Рязанской области за 2009–2018 гг. [2]. Н.В. Кривенко из Института экономики УрО РАН провела исследование обеспеченности ресурсами на примере федеральных округов России [1].

Старение населения России и рост хронических неинфекционных заболеваний увеличивают нагрузку на систему здравоохранения. Анализ доступности медицинской помощи позволяет оценить, насколько ресурсы регионов готовы к этим вызовам, выявить реальные проблемы и диспропорции. Анализируя демографические тренды (старение населения, миграцию), можно заранее предвидеть, какие изменения в системе здравоохранения понадобятся в ближайшие годы, и закладывать это в стратегии развития.

Цель настоящего исследования – анализ ресурсного обеспечения организаций здравоохранения регионов России и на его основе определение доступности медицинской помощи.

Анализ обеспечения ресурсами организаций здравоохранения проводился по данным Росстата за 2015–2024 гг. [3] с использованием методов сравнительного и корреляционного анализа.

Анализ ресурсного обеспечения организаций здравоохранения России

Основными показателями, определяющими

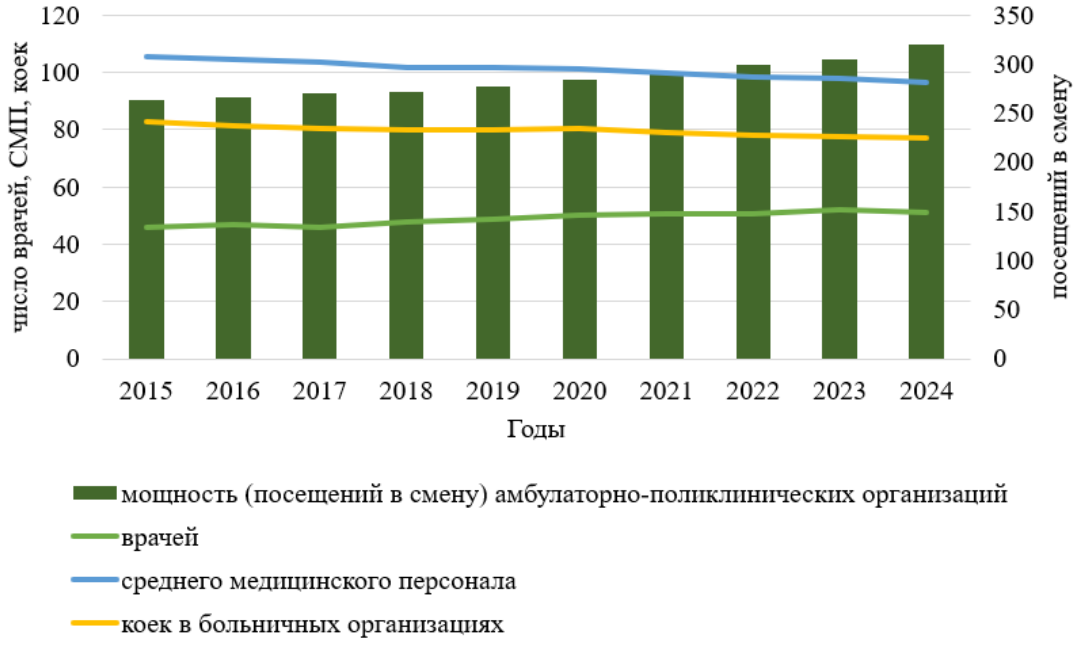


Рис. 1. Динамика показателей обеспеченности ресурсами на 10 тыс. населения в среднем по России за 2015–2024 гг.

ресурсную обеспеченность, являются обеспеченность на 10 тыс. населения врачами, средним медицинским персоналом (**СМП**), коечным фондом, мощность (посещений в смену) амбулаторно-поликлинических организаций (**АПО**). Динамика этих показателей за 2015–2024 гг. представлена на рис. 1.

За десять лет мощность АПО и число врачей на 10 тыс. населения выросли соответственно на 21,3 % и на 12,3 %, а число СМП и больничных коек, наоборот, сократилось на 8,5 % и на 7,0 % соответственно. Снижение численности среднего медперсонала объясняется низким уровнем оплаты труда, а также внедрением цифровых технологий в процесс оказания медицинских услуг.

Сокращение стационарного звена в здравоохранении сопровождалось ростом амбулаторно-поликлинического обслуживания. За десять лет число больничных организаций снизилось на 7,3 % с 5,4 тыс. в 2015 г. до 5,0 тыс. в 2024 г., при этом число амбулаторно-поликлинических организаций выросло на 24,2 % с 18,6 тыс. до 23,1 тыс. Это связано, во-первых, с процессом оптимизации, проводившимся в эти годы в здравоохранении, когда небольшие больницы с низкой загрузкой закрывали либо объединяли в более крупные медицинские комплексы. Одновременно государство стало активнее перенаправлять средства в амбулаторно-поликлиническое звено: закупать современное диагностическое оборудование, развивать телемедицину. Основная задача этих мер – профилактика и ранняя диагностика болезней, а также лечение многих состояний без круглосуточного пребывания в стационаре. Во-вторых, старение населения и рост доли хронических неинфекционных заболеваний увеличивают потребность в регулярном наблюдении и консультациях, а не в длительном стационарном лечении. В-третьих, развитие медицинских технологий и современные методы лечения (малоинвазивные операции, длительная дистанционная поддержка) позволяют эффективно лечить многие состояния вне больницы. Таким образом, система здравоохранения России стала делать больший акцент на предотвращение болезней и менее инвазивные методы, отдавая приоритет амбулаторной помощи.

Если рассмотреть показатели обеспеченности ресурсами на 10 тыс. населения в разрезе регионов, то можно увидеть существенный разброс значений.

Численность врачей на 10 тыс. населения в 2024 г. колеблется от 31,8 в Курганской обл. до 88,7 в г. Санкт-Петербурге. Низкая обеспеченность врачами (до 40,0) наблюдается также во Владимирской, Вологодской, Ленинградской,

Таблица 1. Расчет интегрального коэффициента ресурсной обеспеченности регионов России за 2024 г.

Регионы	Коэффициент ресурсной обеспеченности по численности				Интегральный коэффициент ресурсной обеспеченности
	врачей	СМП	мощности АПО	больничных коек	
Российская Федерация	51,3 ($K = 1$)	96,3 ($K = 1$)	319,6 ($K = 1$)	77,2 ($K = 1$)	($K = 1$)
Чукотский автономный округ	1,433	1,611	1,513	1,759	6,143
Республика Коми	1,041	1,546	1,484	1,346	3,215
Сахалинская область	1,398	1,475	0,955	1,531	3,012
Магаданская область	1,193	1,505	1,301	1,194	2,789
Архангельская область	1,199	1,322	1,421	1,180	2,657
Камчатский край	1,195	1,374	1,140	1,405	2,629
Московская область	0,819	0,709	0,787	0,795	0,363
г. Севастополь	0,873	0,723	0,643	0,860	0,349
Республика Ингушетия	1,008	0,976	0,513	0,579	0,292
Ленинградская область	0,712	0,663	0,775	0,737	0,269
Чеченская Республика	0,643	0,818	0,629	0,727	0,240
Республика Дагестан	0,750	0,875	0,334	0,916	0,201

Псковской, Ростовской областях, респ. Адыгея, Дагестан, Марий Эл, Хакасия, Чеченской респ. и Еврейской автономной области. Высокая обеспеченность (свыше 62,0) – в Москве, респ. Северная Осетия – Алания, Томской, Сахалинской областях, Ямало-Ненецком и Чукотском автономных округах. По динамике численности врачей на 10 тыс. населения за девять лет наибольший прирост произошел в Ямало-Ненецком автономном округе (+39,1 %), Тамбовской (+30,4 %) и Сахалинской областях (+29,9 %), а наибольшее снижение – в респ. Калмыкия (–10,1 %), Удмуртской респ. и Еврейской автономной области (по –3,9 %).

Численность среднего медицинского персонала на 10 тыс. населения в 2024 г. колеблется от 63,8 в Ленинградской обл. до 167,1 в Ямало-Ненецком автономном округе. Низкая обеспеченность средним медицинским персоналом (до 85,0) наблюдается также в Калужской, Московской, Калининградской, Ростовской областях, городах Москва, Севастополь, респ. Адыгея, Дагестан и Чеченской респ. Высокая обеспеченность (свыше 140,0) – в респ. Коми, Тыва, Магаданской, Сахалинской областях и Чукотском автономном округе. По динамике численности СМП на 10 тыс. населения за девять лет наибольший прирост произошел в Ямало-Ненецком автономном округе (+14,4 %), Чеченской респ. (+11,6 %) и респ. Ингушетия (+11,2 %), а наибольшее снижение – в Удмуртской респ. (–24,9 %), Новгородской (–18,4 %) и Кемеровской областях (по –18,2 %).

Мощность АПО на 10 тыс. населения в 2024 г. колеблется от 106,9 в респ. Дагестан до 595,8 в Новгородской обл. Низкая посещаемость поликлиник (до 230,0) наблюдается также в респ. Крым, Ингушетия, Кабардино-Балкарской, Чеченской респ., г. Севастополе, Ставропольском крае. Высокая (свыше 400,0) – во Владимирской, Архангельской, Магаданской областях, г. Москве, респ. Коми и Чукотском автономном округе. По динамике мощности АПО на 10 тыс. населения за девять лет наибольший прирост произошел в Новгородской обл. (+79,7 %), г. Москве (+71,3 %) и Ростовской обл. (+60,1 %), а наибольшее снижение – в респ. Дагестан (–6,6 %), Тыва (–4,3 %) и Магаданской обл. (по –4,1 %).

Число коек в больничных организациях на 10 тыс. населения в 2024 г. колеблется от 44,7 в респ. Ингушетия до 135,8 в Чукотском автоном-

ном округе. Наименьшее число коек (до 62,0) наблюдается также в Московской, Ленинградской областях, г. Москве, Ненецком автономном округе, Чеченской респ., респ. Татарстан. Высокая численность (свыше 100,0) – в респ. Коми, Тыва, Мурманской, Томской и Сахалинской областях. По динамике числа больничных коек на 10 тыс. населения за девять лет наибольший прирост произошел в Псковской области (+9,4 %), г. Севастополе (+7,3 %) и Ростовской обл. (+6,9 %), а наибольшее снижение – в Ненецком автономном округе (в два раза), Еврейской автономной (–26,6 %) и Магаданской областях (по –21,8 %).

Высокая обеспеченность врачами в Москве и Санкт-Петербурге объясняется значительной концентрацией в них медицинских учреждений: федеральных, городских, ведомственных клиник, научно-исследовательских институтов, а также высоким уровнем финансирования, которое позволяет реализовывать целевые программы привлечения кадров. По остальным регионам географическое расположение и уровень плотности населения не показали четкой связи с обеспеченностью врачами. В одном и том же федеральном округе присутствуют регионы с прямо противоположной обеспеченностью ресурсами.

В табл. 1 приведен расчет интегрального коэффициента уровня ресурсной обеспеченности по регионам как произведение коэффициентов соотношения фактических показателей к среднероссийским, принятым за нормативную величину, равную единице.

Примечательно, что лидерами по обеспеченности ресурсами здравоохранения стали преимущественно северные регионы страны, а наихудший показатель в Северо-Кавказских регионах, Московской и Ленинградской областях.

Расходы на здравоохранение консолидированных бюджетов регионов и средств территориальных фондов обязательного медицинского страхования в среднем за девять лет выросли на 93,0 % при уровне инфляции за этот период 73,8 %. При этом в 51 регионе из 85 прирост расходов был ниже уровня инфляции по региону, что свидетельствует о недостаточном финансировании регионального здравоохранения.

Корреляционный анализ показал существенную прямую связь между соотношением заработной платы к прожиточному минимуму в регионе и количеством врачей и СМП на 10 тыс. населения (коэффициенты линейной корреляции 0,75 и 0,55 соответственно). Также прослеживается прямая связь между расходами на территориальные программы государственных гарантий на одного жителя/застрахованного и обеспеченностью средним медицинским персоналом и врачами (коэффициенты линейной корреляции 0,83 и 0,61 соответственно). Все коэффициенты линейной корреляции с вероятностью 95 % статистически значимы.

Таким образом, исследование показало, что в России наблюдается значительная дифференциация показателей обеспеченности медицинскими ресурсами по регионам: есть как регионы с высокой, так и с крайне низкой обеспеченностью врачами, средним медперсоналом, больничными койками и мощностью амбулаторно-поликлинических организаций. Динамика за девять лет неоднородна – в одних регионах зафиксирован существенный прирост показателей, в других, наоборот, их снижение. Ключевыми факторами обеспеченности кадрами выступают уровень финансирования и уровень зарплаты медицинских работников относительно прожиточного минимума в регионе, а не географическое положение или плотность населения.

Список литературы

1. Кравченко, Н.В. Уровень доступности медицинской помощи населению России: региональная дифференциация // Региональные аспекты экономического роста. – 2024. – Т. 25. – № 2. – С. 89–107.

2. Медведева, О.В. Региональное общественное здоровье: оценка вклада кадровой обеспеченности здравоохранения / О.В. Медведева, Л.И. Меньшикова, Н.В. Чвырева, А.В. Гажева, И.Н. Большов // Экология человека. – 2021. – № 12. – С. 4–13.

3. Росстат. Статистика. Официальная статистика. Население. Здравоохранение [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://rosstat.gov.ru/folder/13721.

References

1. Kravchenko, N.V. Uroven' dostupnosti meditsinskoy pomoshchi naseleniyu Rossii: regional'naya differentsiatsiya // Regional'nyye aspekty ekonomicheskogo rosta. – 2024. – T. 25. – № 2. – S. 89–107.
2. Medvedeva, O.V. Regional'noye obshchestvennoye zdorov'ye: otsenka vklada kadrovoy obespechennosti zdravookhraneniya / O.V. Medvedeva, L.I. Men'shikova, N.V. Chvyreva, A.V. Gazheva, I.N. Bol'shov // Ekologiya cheloveka. – 2021. – № 12. – S. 4–13.
3. Rosstat. Statistika. Ofitsial'naya statistika. Naseleniye. Zdravookhraneniye [Electronic resource]. – Access mode : https://rosstat.gov.ru/folder/13721.

© Л.В. Горшкова, 2026

УДК 669.053

Т.И. КУЗНЕЦОВА
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МАРКЕТПЛЕЙСЫ КАК ДРАЙВЕРЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА

Ключевые слова: маркетплейс как экосистема; принцип *shop-in-shop*; сертификат соответствия; технологическая интеграция; фулфилмент; дрон-доставка; *B2B*-платформа.

Аннотация. В условиях турбулентности внешней среды наблюдается устойчивый тренд перехода промышленных предприятий к использованию *B2B*-платформ как инструмента оптимизации сбытовых и закупочных процессов. Однако практика внедрения таких решений сопряжена с рядом институциональных барьеров: жесткие лимиты на реализацию сложного крупнотоннажного оборудования, требования к раскрытию внутренних учетных данных, риски утечки важной коммерческой информации. Указанные обстоятельства обусловливают необходимость углубленного анализа функциональных возможностей промышленных маркетплейсов. Цель статьи – формирование адаптивной стратегии поведения промышленных предприятий на цифровых торговых площадках. В круг задач входят: оценка потенциала *B2B*-платформ в автоматизации воспроизводственных процессов, выявление баланса преимуществ и ограничений для контрагентов, систематизация рисков и регламентов сделок, обзор специфики ведущих российских и зарубежных решений, а также разработка практических рекомендаций по повышению эффективности работы предприятий в цифровой среде.

Исследовательская гипотеза базируется на предположении, что *B2B*-платформы выступают не просто каналом сбыта, а стратегическим активом, обеспечивающим устойчивость бизнеса в кризисных условиях.

Методы исследования: системный анализ, методы компаративистики и обобщения эмпирических данных.

В результате проведенного исследования систематизированы подходы к использованию маркетплейсов промышленными предприятиями, предложен комплекс мер по нивелированию рисков и усилению конкурентных позиций поставщиков в цифровой среде.

Динамика роста числа *B2B*-решений напрямую коррелирует с повышением осведомленности менеджмента о выгодах цифровой трансформации. Индустриальные игроки все чаще делегируют платформам функции управления закупками, поиска технологических партнеров и организации межфирменной кооперации. Такие системы эффективно автоматизируют рутинные закупочные процедуры в сегменте стандартизированной продукции, обеспечивают взаимодействие заказчиков с подрядчиками в металлообработке, формируют среду для промышленной коллаборации и оперативного обеспечения спецтехники комплектующими.

Двусторонняя полезность промышленных маркетплейсов очевидна: поставщики получают экономию на маркетинговом бюджете благодаря агрегированному трафику, улучшенной визуализации предложений, стабилизации денежных потоков и наращиванию оборотов. Сами площадки, в свою очередь, заинтересованы в профессиональной аудитории, ориентированной на приобретение металлопродукции.

Среди российских предприятий производственного сектора востребованы следующие специализированные онлайн-ресурсы:

– *Metal Processing Hub* – платформа, инициированная ПАО «Северсталь», выполняет функции сервис-гаранта в металлообработке, обеспечивая исполнительскую дисциплину, гарантии оплаты и подключение проверенных

субподрядчиков;

– *Cometal* представляет собой агрегатор производственных мощностей для выпуска металлоизделий, предоставляя детализированную базу технических возможностей исполнителей с акцентом на сжатые сроки исполнения заказов;

– *Tech Ex* выступает пространством для прямой коммуникации участников рынка без разделения на заказчиков и исполнителей, не вмешиваясь в расчетно-договорную сферу, а лишь обеспечивая среду для взаимодействия;

– «Запчасть.РФ» специализируется на обеспечении спецтехники, предлагая интеллектуальный поиск деталей по артикулам, рейтингование предложений и логистическую матрицу; номенклатура каталога превышает 12,5 млн позиций [1].

При всех достоинствах платформенных решений предприятия сталкиваются с рядом системных ограничений: запрет на реализацию сложной металлопродукции крупных типоразмеров; обязанность предоставлять оперативные данные по номенклатуре и остаткам; риски раскрытия конфиденциальной информации, включая элементы, относимые к коммерческой тайне [2].

В работе идентифицированы ключевые зоны уязвимости для производственных компаний на маркетплейсах. Прежде всего, это угроза недобросовестного конкурентного поведения – более искушенные игроки могут использовать демпинговые стратегии, фиктивные заказы или накрутку негативных отзывов для подрыва репутации новичков. Кроме того, сохраняется проблема нечеткой регламентации оборота отдельных категорий запчастей (например, элементов военного назначения, источников с ионизирующим излучением или контрафактной продукции). Отмечается также риск блокировки учетной записи из-за массовой отмены заказов вследствие отсутствия товарного запаса, что требует от продавцов строгого контроля актуальности складских данных.

Покупателям, в свою очередь, рекомендуется проверять наличие товарного знака у контрагента, так как его отсутствие чревато судебными исками и штрафными санкциями. В качестве превентивных мер автор предлагает систематически мониторить активность конкурентов, отслеживать всплески заказов и заблаговременно подготавливать правоустанавливающие документы.

Для минимизации рисков целесообразно тщательно анализировать оферту площадки: размер комиссионного вознаграждения, условия складского хранения (собственный склад против *FBO*-модели), логистические схемы, требования к упаковке и маркировке, а также сезонные колебания спроса. Не менее важно изучать конкурентное окружение и обеспечивать наличие полного пакета разрешительной документации:

– сертификат соответствия техническим регламентам;

– декларация о безопасности продукции;

– отказное письмо, освобождающее от обязательной сертификации;

– маркировка в системе «Честный знак» для регламентированных категорий.

Соблюдение перечисленных норм позволяет автоматизировать закупочные циклы, диверсифицировать источники снабжения и сократить транзакционные издержки.

В условиях цифровой зрелости промышленные маркетплейсы эволюционируют в полноценные экосистемы, аккумулирующие широкий спектр сервисов. К характерным чертам такого подхода относятся:

– расширение функционала за счет финансовых модулей (платежи, кредитные линии), логистических агрегаторов, рекламных инструментов;

– локализация контента с учетом национальных стандартов, способов оплаты и логистических практик;

– внедрение технологических инноваций – искусственного интеллекта, машинного обучения, визуального поиска и персонализированных рекомендаций;

– развитие фулфилмент-сервисов по модели *FBA*, предполагающих полный цикл складской обработки и доставки силами платформы.

За рубежом промышленные маркетплейсы представляют собой сложные экосистемы, включающие не только торговые площадки, но и дополнительные сервисы, логистические решения, финансовые рычаги и инструменты для взаимодействия участников рынка. Они трансформируют международную торговлю, снижают барьеры для выхода бизнеса на глобальные рынки и способствуют развитию цифровой экономики.

Примеры зарубежных маркетплейсов как экосистем:



Рис. 1. Популярные категории металлопродукции на маркетплейсе Платферрум

– *Amazon* (США) – крупнейший маркетплейс с развитой экосистемой, включающей торговлю, облачные сервисы *AWS*, рекламу, подписки, *AI*-ассистентов, визуальный поиск, программу *Prime* (бесплатная быстрая доставка);

– *Alibaba* (Китай) – платформа для *B2B*-продаж предлагает широкий ассортимент товаров, включая машиностроение, электронику и другие товары;

– *JD.com* (Китай) – крупный маркетплейс с развитой логистикой, сетью складов и дрон-доставкой, специализируется на инвестициях в *WMS*-системы, которые управляют внутренними складскими операциями от приемки товаров до их отгрузки;

– *Mercado Libre* (Латинская Америка) – крупнейший экосистемный маркетплейс региона, включающий торговлю, рекламную деятельность, сервисы доставки, онлайн-площадки недвижимости.

На российском рынке показательным примером является маркетплейс «Платферрум», обслуживающий более 2,2 тыс. производственных компаний, при этом каждая десятая транзакция приходится на крупный бизнес (максимальный зафиксированный объем – 2,2 тыс. тонн) [5]. Данная площадка позиционируется как экосистема, предлагающая девять сервисных направлений: от металлообработки и ценовой аналитики до программы лояльности и банковского сопровождения сделок. Ключевым нововведением стал институт безопасных сделок, где платформа берет на себя роль независимого гаранта исполнения обязательств.

Кроме того, «Платферрум» внедрил механизм отсроченного платежа (ставка от 8 до 16 % годовых) как альтернативу классическому кредитованию, а также запустил программу лояльности, нацеленную на персональное поощрение сотрудников заказчиков (доступно более 100 тыс. наименований призов). Это решение увеличило конверсию в четыре раза [3; 4].

Технологической основой платформы стал ИТ-модуль, автоматически обновляющий цены и остатки, а также внедренный принцип *shop-in-shop*, позволяющий каждому поставщику иметь виртуальную витрину. В перспективе заявлены запуск собственной логистики и внедрение *AI*-алгоритмов для клиентской поддержки.

Компании-перекупщики с сомнительной репутацией на платформу не допускаются. Клиент может настроить фильтр под свой запрос, получить несколько подходящих предложений, выбрать лучшие предложения с учетом цены и логистики (рис. 1).

Для покупки металлопродукции необходимо сделать несколько шагов: регистрацию, выбор товара, оформление заказа и оплату. Сделка проходит онлайн. Комиссии не взимаются. Ограничений по минимальному объему заказа нет. Внедрение технологий открывает широкие возможности для торговли.

Развивая клиентский сервис, компании повышают уровень доверия клиентов к своим продуктам, обеспечивают положительный имидж, а следовательно, и рост продаж. В данной связи автор предлагает расширить перечень предлагаемых экосистемой услуг через создание собственной логистической системы, внедрение искусственного интеллекта для оптимизации работы с клиентами.

Автор обращает внимание на стратегическую значимость развития сервисной составляющей. Создание собственной логистической сети и интеграция интеллектуальных систем будут способствовать укреплению доверия и росту продаж.

Вместе с тем функционирование экосистем сопряжено с комплексом рисков: финансовых (скрытые издержки при масштабировании), юридических (возможность одностороннего изменения правил площадкой), репутационных (бот-атаки и фейковые возвраты), технологических (сбои серверов и сетей), а также риска чрезмерной зависимости от единственного цифрового канала.

Таким образом, промышленные маркетплейсы в современном понимании представляют собой многофункциональные образования, которые не только снижают транзакционные барьеры, но и формируют новые паттерны взаимодействия, стимулируя развитие цифровой экономики и трансграничного сотрудничества. Однако их эффективное освоение требует системного учета как технологических, так и институциональных факторов.

Список литературы

1. Кузнецов, А.А. Трансформация бизнес-процессов на основе информационной системы производственной логистики металлургического комплекса // Инновационное предпринимательство в эпоху глобальных перемен: стратегии адаптации и партнерские возможности : сборник научных статей участников международной научно-практической конференции, 16.04.2024 г. – М. : Образование.Пресс, 2024. – С. 296–299.

2. Кузнецов, А.А. Совершенствование производственной системы металлургического предприятия на основе инноваций // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 3(129). – С. 140–142.

3. Кузнецова, Т.И. Новые системы контроля современного высокотехнологичного производства // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 113–115.

4. Скворцова, Д.А. Особенности организации интеллектуальных производственных систем / Д.А. Скворцова, Е.В. Ершова // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 3(1219). – С. 92–94.

5. Технологии на страже клиентского опыта // Металлоснабжение и сбыт. – 2024. – № 10. – С. 128–129.

References

1. Kuznetsov, A.A. Transformatsiya biznes-protsessov na osnove informatsionnoy sistemy proizvodstvennoy logistiki metallurgicheskogo kompleksa // Innovatsionnoye predprinimatel'stvo v epokhu global'nykh peremen: strategii adaptatsii i partnerskiye vozmozhnosti : sbornik nauchnykh statey uchastnikov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 16.04.2024 g. – M. : Obrazovaniye. Press, 2024. – S. 296–299.

2. Kuznetsov, A.A. Sovershenstvovaniye proizvodstvennoy sistemy metallurgicheskogo predpriyatiya na osnove innovatsiy // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 3(129). – S. 140–142.

3. Kuznetsova, T.I. Novyye sistemy kontrolya sovremennogo vysokotekhnologichnogo proizvodstva // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 7(133). – S. 113–115.

4. Skvortsova, D.A. Osobennosti organizatsii intellektual'nykh proizvodstvennykh sistem / D.A. Skvortsova, Ye.V. Yershova // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 3(1219). – S. 92–94.

5. Tekhnologii na strazhe kliyentskogo opyta // Metallosnabzheniye i sbyt. – 2024. – № 10. – S. 128–129.

© Т.И. Кузнецова, 2026

УДК 336.6

И.Е. БЕЛЬСКИХ, К.В. МАРКЕЛОВ
Волгоградский филиал ФГАОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», г. Волгоград

ОБЛИГАЦИОННЫЕ СТРАТЕГИИ ФИНАНСИРОВАНИЯ ИННОВАЦИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОМПАНИЙ НА ВНУТРЕННЕМ РЫНКЕ

Ключевые слова: внутренний рынок; жизненный цикл компании; облигационные стратегии; финансирование инноваций.

Аннотация. Предмет исследования: процессы управления облигационным финансированием инноваций компаний на разных этапах жизненного цикла.

Цель данной статьи – поиск и изучение облигационного финансирования инноваций как основы для обеспечения развития компании на внутреннем рынке в разные периоды жизненного цикла.

Теоретико-методологические основы: анализ материалов исследования методами циклического, экспертного и системного анализа.

Применение полученных результатов целесообразно в сфере формирования практики финансирования инноваций при использовании облигационных стратегий, направленных на развитие компании на разных этапах жизненного цикла. Был сформирован выбор стратегии в зависимости от инновационных и отраслевых задач финансирования.

Финансирование инноваций на различных этапах жизненного цикла организаций – сложная и интересная тема для исследования в условиях санкционного давления на экономику и страну. Важнейший источник финансирования развития компаний – внутренний финансовый рынок. Получить стабильное финансирование возможно при условии использования различных стратегий, ориентированных на этапы развития компании.

Традиционно в экономической литературе понятие жизненного цикла рассматривается с позиции продукта и маркетинговых концепций. Считают, что есть фаза внедрения, роста, зрелости, насыщения рынка и период упадка в сфере товарного предложения. И на каждом этапе жизненного цикла товара существует определенная зависимость и специфика, на нее сильно влияют текущий период, особенности рынка, специфика отрасли. С точки зрения современных концепций менеджмента, например в фундаментальной работе А.И. Пригожина [6], методы развития организации рассматриваются аналогично. Жизненный цикл организации идет по разным схемам, более подробным, менее уточненным концепциям развития компании. Традиционно выделяют три фазы (этапа): рост, зрелость и старение. Концепция жизненного цикла организации, по аналогии с маркетинговой концепцией жизненного цикла, выделенная А.И. Пригожиным, отражает множество характерных и специфических черт эволюции компании, для каждой из которых характерен свой тип финансирования изменений [6]. Инновационность любой организации – это залог ее стратегического развития по этапам своего существования.

Значительный вклад в изучение темы финансирования инноваций и проблематики цифровизации внесли работы таких ученых, как Ю.В. Гапоненко, А.И. Гончаров, М.В. Гончарова, С.А. Савина, А.В. Тележников и др. [3; 4]. Поиск оптимальных решений на рынке облигаций изучался такими авторами, как И.Е. Бельских, Х.Х. Джораев, М.В. Леденева, М.А. Паршин, Е.А. Радионова, Ф.Д. Фабоцци [2; 5; 8]. Обоснования роста стоимости компании с позиции сочетания жизненного цикла компании и управления стоимостью нашли отражение в статьях А.Ю. Дмитриева, А.В. Редогощенко и др. [1; 7].

Изучение механизмов финансирования ин-

Таблица 1. Типы облигационных стратегий финансирования инноваций компаний на внутреннем рынке в зависимости от этапа жизненного цикла компании

N	Вариант облигационной стратегии	Инновационная и отраслевая специфика финансирования компании	Преимущества при использовании на разных этапах жизненного цикла компании
1	Формирование цифровых финансовых активов на российском облигационном рынке	Упрощенная система мониторинга и контроля транзакций; онлайн-регулирование текущего финансирования; упрощенная форма регистрации для компании	На этапе Роста компании наиболее эффективный вариант. Целесообразно использование как формы адаптивной поддержки и на этапах Упадка организации
2	«Народные облигации», инновационный инструмент, пришедший на рынок в 2025 г. Используется платформа ММВБ – Финансовые услуги	Удобны управление рисками и снижение неопределенности при гарантированном интересе инвесторов к финансированию инноваций. Анализ рисков и усиление финансовой устойчивости в условиях только внутреннего рынка	На этапе Роста и Зрелости оптимально снижение затрат на управление финансированием текущих инноваций компании, оптимизация текущих расходов на управление облигационной стратегией
3	Классические облигационные стратегии, направленные на формирование и обслуживание долга компании при достижении периодов зрелости и упадка	Получение всех объемов необходимого фондирования при условии соблюдения правил и условий обслуживания облигационных выпусков на внутреннем рынке	Характерно для использования на этапе Зрелости и Упадка компании, когда есть инвестиционная и организационная репутация. В период становления организации использовать данную стратегию затруднительно

новаций и определение параметров повышения их эффективности на разных этапах жизненного цикла приводят к обоснованию развития современных российских предприятий. Актуальность статьи определена этим вопросом.

Предметом исследования стали процессы управления облигационным финансированием инноваций компаний на разных этапах жизненного цикла. Цель работы – поиск и изучение облигационного финансирования инноваций как основы для обеспечения развития компании на внутреннем рынке в разные периоды жизненного цикла.

Анализ облигационных материалов с фондового рынка на примерах таких инновационных компаний, как Вуш (кикшеринг), Евротранс (электрозаправки), Делимобиль – Руссия (каршеринг), показал зависимость финансирования от этапов жизненного цикла компаний. С позиции реализации конкурентных преимуществ подход к финансированию по теории жизненных циклов оригинален. Если компания формирует позицию на рынке или в отрасли и проходит период становления, то финансирование инновационных и новых интересных идей возможно с позиции традиционных финансовых технологий.

Если фирма существует на рынке давно и находится в периоде зрелости, то здесь совершенно другая ситуация. На этапе упадка организация, которая собирается уходить с рынка или снижает свою деловую активность, как правило, испытывает трудности с финансированием каких-то новых идей и проектов.

На наш взгляд, подход к финансированию с позиций жизненного цикла компании является достаточно интересным, аналитически обоснованным и требует своего изучения. Считаем, что постоянное обновление любой организации, компании требуется в сфере методов управления, управленческого мышления, работы с продукцией (товарами), умения формировать новые интересные взаимовыгодные отношения с клиентурой, поиска позиций и решений по финансированию инновационных идей. Выбор фондирования зависит от существующей финансовой системы и внутреннего рынка, где традиционен инструмент облигационного обеспечения. Анализ облигационных стратегий в русле жизненного цикла организации является интересным управленческим решением, позволяющим обеспечить бесперебойное финансиро-

вание текущей деятельности компании.

Данная политика направлена на формирование привлекательных позиций на рынке облигаций с позиции использования существующих интересов инвесторов и участников. Компания, формируя свою облигационную политику, как правило, стремится обосновывать идеи, проекты, инновации, которые вызовут поддержку клиентов и инвесторов.

Компания на этапе роста будет использовать инновационные методы по привлечению финансирования, например цифровые финансовые активы. Данный подход актуален при реализации интересов тех организаций, у которых нет долгой облигационной истории, репутации на финансовом рынке. Компания на этапе зрелости будет работать в рамках существующих технологий привлечения капитала. В русле облигационных стратегий организация не будет искать какие-то новые интересные опции фондирования. Компания на стадии упадка будет использовать все виды технологий, тем самым показывая свою способность к существованию. Базовая позиция определяется жизненным циклом компании, который четко прослеживается на разных вариантах использования облигационных стратегий.

Характеризуя развитие компании, можем использовать оценку облигационной политики на финансовом рынке с позиции этапа цикла.

Теоретико-методологическими основами стали методы циклического, экспертного и системного анализа. В статье был реализован экспертный анализ темы на основе предыдущих исследований и использованы авторские наработки по теме.

Результаты исследования по итогам анализа эмпирических и теоретических источников позволяют сформировать таблицу, где отражены основные результаты данного исследования. В табл. 1 сформирован подход к выбору облигационной стратегии в зависимости от инновационных и отраслевых задач финансирования.

Основные выводы по итогам изучения нашего материала: было рассмотрено несколько крупных компаний, которые занимаются внедрением инновационных продуктов на отечественном рынке. Эти компании зависят от облигационных программ финансирования своих инноваций. Важно учесть, что внутренний рынок в условиях текущей экономической ситуации, высокой стоимости капитала и санкционного давления предъявляет особые требования к умению работать с внутренним финансированием. Работа на внутреннем рынке предполагает, что есть несколько способов финансирования своих инновационных проектов, и наиболее популярен облигационный вариант финансирования. В условиях санкций внешние рынки для финансирования инноваций недоступны. Теория жизненных циклов компании целесообразна для практического применения на облигационном рынке. Были выделены три типа облигационной стратегии. Применение полученных результатов возможно в сфере реализации инновационных проектов компаний при формировании их развития на рынке.

Список литературы

1. Бельских, И.Е. Влияние корпоративного управления на формирование стоимости бизнеса: выбор оптимальных направлений для финансовой сферы / И.Е. Бельских, А.Ю. Дмитриев // Наука и бизнес: пути развития. – 2026. – № 2. – С. 103–106.

2. Бельских, И.Е. Квазивалютные облигации как альтернативное финансирование корпоративного сектора в условиях санкций / И.Е. Бельских, Е.А. Радионова, М.В. Леденева // Финансовый бизнес. – 2026. – № 1. – С. 108–111.

3. Гапоненко, Ю.В. Оценка эффективности инновационного проекта внедрения BI-систем / Ю.В. Гапоненко, А.В. Тележников, С.А. Савина // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т. 13. – № 11. – С. 4891–4902.

4. Гончарова, М.В. Модернизация инвестиционной технологии выпуска и оборота цифровых финансовых активов / М.В. Гончарова, А.И. Гончаров // AlterEconomics. – 2023. – Т. 20. – № 3. – С. 570–602.

5. Паршин, М.А. Перспективы развития финансового рынка в Российской Федерации: корпоративные облигации и структурные облигации / М.А. Паршин, Х.Х. Джораев // Russian Economic Bulletin. – 2020. – Т. 3. – № 2. – С. 194–199.

6. Пригожин, А.И. Методы развития организаций / А.И. Пригожин. – М. : МЦФЭР,

2003. – 864 с.

7. Редогощенко, А.В. Корпоративное управление: формы и методы корпоративного контроля, управление стоимостью фирмы / А.В. Редогощенко // Финансовый бизнес. – 2024. – № 11(257). – С. 52–56.

8. Фабоцци, Ф.Д. Рынок облигаций: анализ и стратегии / Ф.Д. Фабоцци. – М. : Альпина Паблишер, 2025. – 1195 с.

References

1. Bel'skikh, I.Ye. Vliyaniye korporativnogo upravleniya na formirovaniye stoimosti biznesa: vybor optimal'nykh napravleniy dlya finansovoy sfery / I.Ye. Bel'skikh, A.YU. Dmitriyev // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2026. – № 2. – S. 103–106.

2. Bel'skikh, I.Ye. Kvazivalyutnyye obligatsii kak al'ternativnoye finansirovaniye korporativnogo sektora v usloviyakh sanktsiy / I.Ye. Bel'skikh, Ye.A. Radionova, M.V. Ledeneva // Finansovyy biznes. – 2026. – № 1. – S. 108–111.

3. Gaponenko, YU.V. Otsenka effektivnosti innovatsionnogo proyekta vnedreniya BI-sistem / YU.V. Gaponenko, A.V. Telezhnikov, S.A. Savina // Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. – 2023. – T. 13. – № 11. – S. 4891–4902.

4. Goncharova, M.V. Modernizatsiya investitsionnoy tekhnologii vypuska i oborota tsifrovykh finansovykh aktivov / M.V. Goncharova, A.I. Goncharov // AlterEconomics. – 2023. – T. 20. – № 3. – S. 570–602.

5. Parshin, M.A. Perspektivy razvitiya finansovogo rynka v Rossiyskoy Federatsii: korporativnyye obligatsii i strukturnyye obligatsii / M.A. Parshin, KH.KH. Dzhorayev // Russian Economic Bulletin. – 2020. – T. 3. – № 2. – S. 194–199.

6. Prigozhin, A.I. Metody razvitiya organizatsiy / A.I. Prigozhin. – M. : MTSFER, 2003. – 864 s.

7. Redogoshchenko, A.V. Korporativnoye upravleniye: formy i metody korporativnogo kontrolya, upravleniye stoimost'yu firmy / A.V. Redogoshchenko // Finansovyy biznes. – 2024. – № 11(257). – S. 52–56.

8. Fabotstsi, F.D. Rynok obligatsiy: analiz i strategii / F.D. Fabotstsi. – M. : Al'pina Pablisher, 2025. – 1195 s.

© И.Е. Бельских, К.В. Маркелов, 2026

УДК 65.016.7

А.А. АРОНЧИКОВ, А.В. КУДРЯВЦЕВА
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ КОРПОРАТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ В ИННОВАЦИОННОЙ КОМПАНИИ

Ключевые слова: аудит; алгоритмы; инновации; инновационная компания; обучение.

Аннотация. Целью данной статьи является выстраивание системы мероприятий в рамках оптимизации процесса корпоративного обучения. Задачи включают в себя анализ алгоритма принятия решения об обучении, рассмотрение вопроса об образовательном контенте для корпоративного обучения, анализ особенностей аудита в корпоративном обучении. Гипотеза исследования состоит в том, что корпоративное обучение является драйвером инновационного развития компании. Методы исследования включают в себя сравнительный анализ, экспертную оценку, глубинное интервью, алгоритмизацию. Основным результатом проведенного исследования является практический инструментарий внедрения алгоритма корпоративного обучения.

Развитие инновационного потенциала любой компании очевидно невозможно без обучения сотрудников. Соответственно, важным этапом является принятие решения об обучении. Целью данной статьи является рассмотрение вопроса о внедрении обучения как элемента инновационной политики современной компании.

В ходе исследования на первом этапе нами

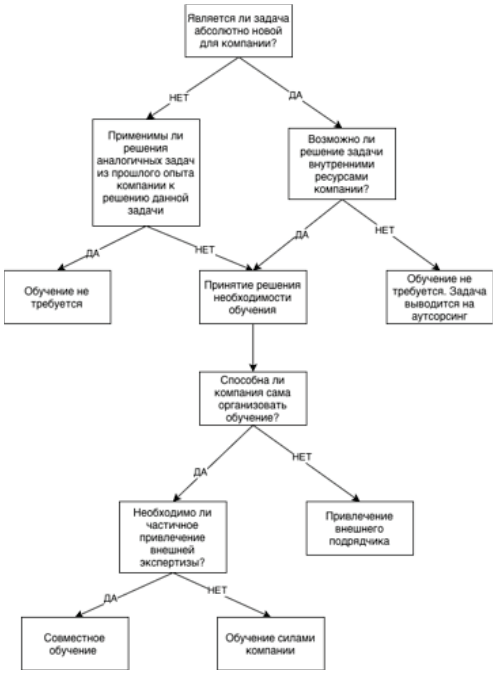


Рис. 1. Алгоритм реализации механизма принятия решения об обучении 1

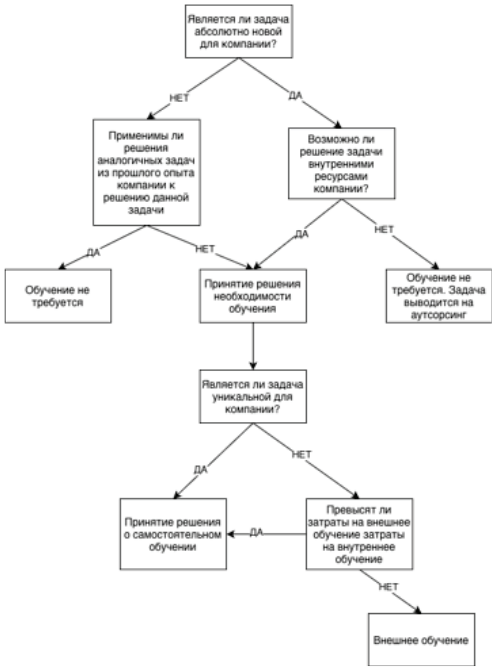


Рис. 2. Алгоритм реализации механизма принятия решения об обучении 2

Таблица 1. Результат оценки экспертов

	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3
Алгоритм 1	0,6	0,7	0,6
Алгоритм 2	0,4	0,3	0,4

Таблица 2. Чек-лист для проверки достаточности образовательного контента

Характеристика	Да/Нет
Контент содержит объяснения базовых понятий по теме на уровне, не требующем обращения к внешним ресурсам для понимания	
Контент дает понятие о структуре знаний по теме (содержит разделы, подразделы, классификации)	
Контент содержит новую информацию по теме (минимум 15 % информации на основе данных за последние пять лет)	
Контент содержит разные точки зрения на рассматриваемый вопрос (рассмотрены разные подходы)	
Контент дает представление о связи изучаемой темы с другими областями знания	
Приводится задание для проверки усвоения материала	

было разработано два алгоритма реализации механизма принятия решения об обучении. Они представлены в форме диаграмм.

Мы попросили трех экспертов провести оценку данных алгоритмов. Полученные результаты представлены в табл. 1.



Рис. 3. Алгоритм аудита системы корпоративного обучения инновационной организации

Рассчитаем коэффициент конкордации по формуле:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}.$$

Коэффициент конкордации равен единице.

После того как было принято решение об обучении сотрудников на базе компании, возникает вопрос о выборе образовательного контента, который должен быть достаточным для формирования необходимых компетенций, но не избыточным, чтобы не увеличить нагрузку на сотрудников. В ходе работы нами был сформирован чек-лист для проверки достаточности образовательного контента. Чек-лист сформирован на основе трех глубинных интервью с экспертами в сфере образования (лица с ученой степенью кандидата педагогических наук и опытом работы не менее пяти лет). Чек-лист представлен далее в форме табл. 2.

Далее в работе будет представлен алгоритм аудита системы корпоративного обучения инновационной организации (рис. 3).

Аудит курса позволяет выявить проблемы в процессах или в продукте, чтобы до-



Рис. 4. Алгоритм проведения конкурентного анализа

биться желаемого результата. Любой образовательный продукт: курс, обучающая рассылка, корпоративное образование (внутренний курс для сотрудников, внутренние курсы компании) – может являться продуктом аудита.

Аудит могут провести как члены команды, так и сторонние специалисты. Оптимальным является внешний аудит по следующим причинам:

– высокая объективность оценки курса и его недоработок за счет возможности предоставить непредвзятое мнение и экспертную оценку;

– более высокая и всесторонняя квалификация экспертов;

– консолидация опыта по разработке курсов, полученного другими компаниями;

– возможность предоставления независи-

мой критики.

Возможный метод оценки курса – это конкурентный анализ. Конкурентный анализ выполняется по следующему плану (рис. 4).

Проведенный нами анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Корпоративное обучение – это отдельный бизнес-процесс, обеспечивающий потенциал для развития инновационной организации.

2. Четкая алгоритмизации процессов обучения сотрудников способствует повышению качества корпоративного обучения.

Список литературы

1. Евдокимова, В.Е. Возможности образовательных платформ для организации учебного процесса / В.Е. Евдокимова, О.А. Кириллова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 9. – С. 120–125.

2. Исследование импортозамещения в ИТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://axoftglobal.ru/services/issledovaniye_protsessov_importozameshcheniya_v_it.

3. Как Talent Rocks помог «Ростелекому» обучить 2500 студентов в рамках проекта «Цифровое образование» // Talent Rocks [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://talentrocks.ru/case-rtl.html?t.

4. Отчет об устойчивом развитии группы компаний «Яндекса» 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://rspp.ru/upload/uf/535/bznlyyhvi1oasogpaj5y16gc1d4tzjym/Яндекс%20оур%20 2020.pdf.

References

1. Yevdokimova, V.Ye. Vozmozhnosti obrazovatel'nykh platform dlya organizatsii uchebnogo protsessa / V.Ye. Yevdokimova, O.A. Kirillova // Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii. – 2022. – № 9. – S. 120–125.

2. Issledovaniye importozameshcheniya v IT [Electronic resource]. – Access mode : https://axoftglobal.ru/services/issledovaniye_protsessov_importozameshcheniya_v_it.

3. Kak Talent Rocks pomog «Rostelekomu» obuchit' 2500 studentov v ramkakh proyekta «Tsifrovoye obrazovaniye» // Talent Rocks [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa : https://talentrocks.ru/case-rtl.html?t.

4. Otchet ob ustoychivom razvitii gruppy kompaniy «Yandeksa» 2020 [Electronic resource]. – Access mode : https://rspp.ru/upload/uf/535/bznlyyhvi1oasogpaj5y16gc1d4tzjym/Yandeks%20our%20 2020.pdf.

© А.А. Арончиков, А.В. Кудрявцева, 2026

Abstracts and Keywords

T.Yu. Voitenko, E.A. Kirillovsky, A.V. Firer

Creating an Interactive Chatbot with Elements of the Theory of Inventive Problem Solving

Keywords: chatbot; theory of inventive problem solving (**TRIZ**); large language models; artificial intelligence; automation; GigaChat; Python; Gradio.

Abstract. The aim of this article is to develop and implement an interactive assistant based on large language models (**LLM**) for automating the process of finding inventive solutions. Based on classical TRIZ methodology, the logical and functional architecture of the software package was designed, a TRIZ matrix was integrated into the application structure, and an algorithm for strict deterministic search for inventive techniques using the Altshuller coordinate matrix was implemented. Software interaction with the GigaChat language model API was configured to classify technical contradictions and subsequently intelligently generate final engineering solutions. An intuitive graphical web user interface was developed, including interactive help panels, creativity and response length controls for fine-tuning the neural network. The project's technology stack includes the Python programming language and the Gradio library for building a local web interface, while the extensive GigaChat language model is integrated as the linguistic core.

M.K. Galova, K.S. Korotkov, A.V. Golan, T.A. Stepanova

Development of the Integrated System for Insect Tracking and Migration Path Determination with Population Control Capability

Keywords: insect monitoring; autonomous systems; hardware-software complex; YOLOv8; Hailo-8.

Abstract. The main goal of this research is to develop an autonomous hardware and software system for detecting insect pests based on computer vision and neural-network object recognition. The research objectives included selecting and integrating hardware components, forming an image dataset for training and validating the model, configuring the recognition algorithm, organizing autonomous power supply, and experimentally testing the laboratory prototype. The research hypothesis was that the use of a Raspberry Pi together with a Hailo-8 AI accelerator and a YOLOv8 model would enable image processing directly on the device without continuous access to remote computing resources. The methods used in the study included computer vision, neural-network object recognition, model training on a mixed image dataset, accuracy evaluation, and analysis of detection sequences. As a result, a laboratory prototype of the system was developed, providing local detection of insect pests in a video stream and autonomous operation of the device. Outdoor testing confirmed the operability of the selected architecture and the possibility of accumulating data on pest occurrence. The proposed solution can be used as a basis for creating a distributed monitoring system and for subsequent assessment of pest movement trajectories.

Yu.A. Izvekov, K.O. Svetus, V.O. Kraynyaya, K.D. Valeeva

Application of Physically Informed Neural Networks to Air Flow Control in Pipelines with Complex Geometry

Keywords: physically informed neural networks; airflow; Dean vortices; turbulence; Navier-Stokes equations; control system; artificial intelligence.

Abstract. The objective of this study is to develop and apply physically informed neural networks to control airflow in a pipeline with two 90° bends. To achieve this, the following tasks were set: developing a mathematical model, examining mathematical methods for solving the resulting problem,

implementing a software implementation, training the neural network, and analyzing the results. The study utilized mathematical modeling, data drift detection, and computational fluid dynamics (**CFD**) methods. The control system architecture proposed in the study is based on solving the Navier-Stokes equations and using airflow sensor data. The study reduced turbulence and suppressed Dean vortices by dynamically changing the position of the guide vanes.

N.K. Kazakov, N.A. Ivliev

The Influence of Input Data Transformations and Neural Network Model Selection on the Accuracy of Light Spot Coordinate Estimation for a Quadrant Photodetector

Keywords: quadrant photodetector; position-sensitive detector; neural network; multilayer perceptron; radial basis function network; data preprocessing; whitening; coordinate estimation.

Abstract. The study aims to improve the accuracy of neural network estimation of the light spot center coordinate for a quadrant photodetector through a consistent choice of the input data representation, the optimization algorithm and the model architecture. The objectives are to assess the effect of the feature vector composition and the data transformation, to compare neural network architectures, and to separate the contributions of the data transformation and optimizer adaptivity. The hypothesis assumes that the optimal input data transformation depends on the model type, and a coordinated choice of representation, optimizer and architecture yields a multiplicative accuracy gain. Methods included the study is performed on an experimental dataset of 79,200 observations collected under twelve configurations of the optical setup; four feature vector compositions, five data transformations (centering, standardization, PCA and ZCA whitening), adaptive and non-adaptive optimizers, and neural architectures (perceptrons of various depths, a one-dimensional convolutional network, an RBF network) were systematically compared on a held-out test set with confidence intervals. Results are as follows: concatenating raw and normalized photocurrents reduces the mean absolute error approximately threefold, but only with proper feature scaling; whitening yields a further 10–15 % reduction and increasing the perceptron depth from one to four layers gives another 1.7-fold improvement; an interaction between the data transformation and the model type is revealed, and non-adaptive gradient descent diverges without feature scaling. Conclusion: the best configuration achieves a mean absolute error of about 20 μm over the ±3.75 mm displacement range; the results are applicable to the design of positioning systems based on quadrant photodetectors.

A.V. Kostinevich, V.V. Kostinevich

Application of the Random Forest Algorithm for Predicting Occupational Injuries at Industrial Enterprises

Keywords: risk prediction; occupational injuries; occupational safety; random forest; class imbalance; class weight balancing; synthetic data; machine learning.

Abstract. The aim of this study is to evaluate the effectiveness of a random forest-based model for predicting occupational injury risks under conditions of class imbalance. To achieve this goal, the impact of various operational and human factors on risk levels was investigated using synthetic data, computational experiments were conducted using class weight balancing, and classification performance metrics were analyzed. The research hypothesis posits that employing balanced class weights during model training reduces the number of missed hazardous incidents while maintaining a practically acceptable rate of false positives. The results of the computational experiment demonstrate high model sensitivity to injury risks and good discriminatory power. Equipment age and the hazard class of working conditions emerged as the key predictors of hazardous situations within the developed model. These findings support the hypothesis and justify the applicability of the proposed approach for developing prototype decision support systems in occupational health and safety.

A.V. Kostinevich, V.V. Kostinevich

Comparison and Analysis of Algorithms for Constructing Maximal Matches in an Unweighted Bipartite Graph

Keywords: bipartite graph; maximum matching; Kuhn's algorithm; Hopcroft-Karp algorithm; a comparison of the algorithm efficiency; augmenting path search; depth-first search; breadth-first search.

Abstract. The purpose of this study is to compare the execution time and efficiency of the Kuhn and Hopcroft-Karp algorithms for constructing maximum matchings in unweighted bipartite graphs of various sizes. To achieve this objective, the operating principles of both algorithms were examined, computational experiments were conducted, and a comparative analysis of the obtained results was performed. The research hypothesis is that the efficiency of these algorithms depends on the graph size: the Kuhn algorithm is expected to be more efficient for small graphs, whereas the Hopcroft-Karp algorithm has an advantage when processing large graphs. The study employs theoretical analysis, computational experiments, comparative analysis, and experimental data processing. The results demonstrate that the Kuhn algorithm provides shorter execution times for small graphs, while the Hopcroft-Karp algorithm achieves higher performance on large graphs. The findings confirm the proposed hypothesis and make it possible to determine the most appropriate application domains for each of the algorithms considered.

A.P. Medvedev

Modeling the Effectiveness of Measures to Countercomputer Attacks Based on Nested Piecewise Linear Regressions

Keywords: nested piecewise linear regression; variable clustering; least absolute deviations method; linear-Boolean programming problem; cybersecurity; regression modeling.

Abstract. This paper examines the problem of modeling the effectiveness of countermeasures against cyberattacks using nested piecewise linear regressions. The goal of the study is to develop an algorithmic method for identifying model parameters, forming index sets, and identifying dominant factors. The object of the study is a homogeneous nested piecewise linear regression of the second type; the methods are linear regression analysis and the apparatus of linear Boolean programming for solving the optimization problem.

Results of the study. An algorithmic scheme has been developed that, when the least absolute deviations method is used, allows the problem of identifying the parameters of a type-II piecewise linear regression to be reduced to a linear-Boolean programming problem. Piecewise linear regression models of the effectiveness of measures to counter computer attacks have been constructed based on statistical data from the National Coordination Center for Computer Incidents for the first half of 2026 and the same period of 2025. Dominant factors have been identified, and the results have been interpreted. The following independent variables were used in the model: the number of owners of Russian information resources informed of signs of computer incidents, the number of domain names removed from delegation, the number of notifications sent to Russian telecom operators, and the number of cases of assistance provided to participants in the state system for detecting, preventing, and eliminating the consequences of computer attacks, as well as responding to computer incidents. It has been shown that the dominant factor determining the effectiveness indicator is the removal of domain names from delegation, which confirms the high efficiency of this measure of rapid response to cyber threats.

V.V. Ostrovskii, M.G. Dorrer

**Choosing a Tool for Running Local Language Models:
A Comparative Analysis of Ollama and vLLM**

Keywords: language models; local execution; Ollama; parallel load; performance metrics; response delay; throughput; vLLM.

Abstract. The purpose of the study is to compare Ollama and vLLM as tools for running local language models. The research tasks are to compare initial deployment, resource requirements, response delay, throughput and model maintenance, and to determine the conditions under which each tool is appropriate for practical use. The research methods include analysis of Ollama and vLLM documentation, comparative analysis of functional and operational characteristics, and synthesis of published benchmarking results for TPS, RPS, TTFT, ITL and the P50, P95 and P99 percentiles. The research hypothesis is that the choice of tool depends not only on generation speed, but also on project stage, number of users, and operational requirements. Published external metrics are used as empirical evidence. The result is the conclusion that Ollama is appropriate for rapid local model evaluation, whereas vLLM has advantages under parallel load.

A.A. Savinov, A.G. Solodov

**Determination of a Minimally Sufficient Computing Configuration for
Neural Network Control Algorithms in Power- and Size-Constrained Devices**

Keywords: neural network control algorithms; embedded systems; computing platform; energy efficiency; minimum sufficient configuration; multicriteria evaluation; integral criterion; artificial intelligence.

Abstract. The purpose of this study is to develop a methodology for determining the minimum sufficient computing hardware configuration for implementing neural network control algorithms in embedded systems with strict power consumption and size constraints. To achieve this goal, existing approaches to computing platform selection were analyzed, and an integral evaluation criterion was developed. The research hypothesis is that a comprehensive assessment of hardware platforms based on normalized parameters and their weighted significance improves the selection of the minimum sufficient configuration. The study employs literature analysis, multicriteria evaluation methods, and theoretical analysis. As a result, a methodology is proposed that provides a formalized approach to selecting a computing platform capable of executing a neural network control algorithm while ensuring minimum power consumption.

O.A. Torshina, K.O. Svetus, V.I. Gorbatov, A.F. Mustafin

Mathematical Modeling of Aerodynamic Characteristics

Keywords: mathematical modeling; CFD modeling; computational fluid dynamics; aerodynamic characteristics; air flow; Navier–Stokes equations; turbulent flows.

Abstract. The objective of this study is to develop a mathematical model of a wind tunnel and study airflow parameters using the SOLIDWORKS Flow Simulation software package. This model allows for the measurement of aerodynamic forces and moments, determination of local airflow velocities and flow angles, and the study of surface pressure distribution. Wind tunnel experiments provide the opportunity to observe the actual flow pattern and facilitate the refinement of calculated aerodynamic characteristics at earlier design stages.

To achieve this, the following objectives were set: developing a mathematical model, examining mathematical methods for solving the resulting problem, and implementing a software implementation. The study utilized mathematical modeling and computational fluid dynamics methods. The use of CFD modeling allowed us to obtain detailed information on the flow structure, pressure and velocity

distribution, and to assess the influence of the geometric parameters of the object under study on the aerodynamic characteristics.

S.B. Karimov, O.V. Voronkova

Designing for the Trajectory of a Requirement Change Instead of Its Current Formulation

Keywords: banking information systems; trajectory of requirements change; adaptive architecture; architectural debt; radius of impact; total cost of ownership (**TCO**).

Abstract. Modern banking information systems (**BIS**) are designed in conditions of significant variability of external requirements, including regulations, financial messaging standards such as ISO 20022, anti-money laundering and anti-terrorist financing (**AML/CFT**) requirements, as well as an expanding set of digital channels. The article considers the discrepancy between the practice of designing architecture for the current version of requirements and the objective need to take into account the expected trajectory of their change when making architectural decisions. The purpose of the study is to determine the impact of orientation on the trajectory of changing requirements on the stability of architecture and the total cost of ownership of banking platforms (**TCO**). The methods include a comparative analysis of architectural approaches, scenario modeling, and a systematic review of scientific literature. The results show that designing the current version of requirements reduces initial capital costs but leads to the accumulation of architectural debt and a rapid increase in operating costs. The proposed model for evaluating architectural solutions uses the radius of impact metric and the TCO forecast for a period of five to ten years, which makes it possible to justify the choice of an adaptive architectural approach. The results are of practical importance for system architects, heads of technological divisions of banks and developers of the main banking systems.

A.V. Mansurov, N.N. Minakova, V.V. Zhuravleva, A.A. Lependin, A.P. Varankin

A Hybrid Neural Network Approach to Identifying Secure VPN Network Traffic

Keywords: secure network traffic; virtual private network (**VPN**); network traffic classification; artificial neural network.

Abstract. The aim of the paper is to develop an approach for identifying and classifying types of secure VPN network traffic using a hybrid neural network architecture. There are several tasks that have been set for this: problem field analysis, dataset generation and preparation, hybrid neural network architecture development, its training, and evaluation of the developed approach's effectiveness. Critical analysis, modeling, statistical preprocessing, and training and optimization methods for artificial neural networks are used. The obtained results demonstrate that the trained hybrid neural network architecture of the developed approach successfully identifies both the type of secure VPN protocol and the nature of network activity involved in secure exchange. The average accuracy of the proposed approach for identifying and classifying secure VPN traffic is 0.9347 for "pure" model examples and 0.8453 for more realistic cases with concurrent network activity. The influence of third-party network exchange on the accuracy of identifying the type of VPN connection and the nature of network activity is noted.

M.A. Sidorovich, S.A. Prikhodko, M.A. Popov, Yu.V. Ponomarchuk

On Control Channel Protection for Distributed Traction Systems from Unauthorized Access

Keywords: distributed traction; cybersecurity; intelligent transport systems; SDR; cyberattacks; damage assessment; DMR; radio communication; BER; Locotrol.

Abstract. This article examines key attacks on intelligent distributed traction systems built on radio

communications. The problem is exacerbated by the widespread adoption of software-defined radio (**SDR**), which creates new cybersecurity risks for critical transportation systems. The aim of the study was to identify risk areas for distributed traction systems. A digital radio communication system using standards used in rail transport was modeled, and common software-defined radio-based attack scenarios were analyzed for this system. While it has been experimentally confirmed that attacks using SDRs can disrupt the integrity and availability of radio communications, causing potentially dangerous situations in rail transport, the solutions proposed in this article can mitigate these risks.

S.S. Shipulin, S.V. Bezzateev

A Decentralized Intrusion Detection System Based on Federated Learning and Blockchain Validation

Keywords: federated learning; intrusion detection; blockchain; smart contract; poisoning resilience; security.

Abstract. The article proposes architecture for a decentralized intrusion detection system that combines federated learning with a blockchain-based mechanism for validating model updates. Additionally, a combined approach to robust aggregation is proposed. The study describes threat models, specifically model poisoning, Sybil attacks, and update falsification, along with mitigation methods and a prototype evaluation using public datasets. Issues regarding scalability and privacy are discussed, as well as potential directions for future work.

The research objective is to develop and evaluate the architecture of a decentralized intrusion detection system that integrates federated learning and blockchain validation to enhance resilience against attacks and ensure data privacy. The research tasks are to analyze existing approaches to federated learning and blockchain technologies in the field of network security; to develop a system architecture comprising client components, a blockchain ledger, smart contracts, and a robust aggregation mechanism; to propose defense methods against threats such as model poisoning, Sybil attacks, and update falsification; to implement a system prototype and evaluate its performance using public datasets (NSL-KDD and UNSW-NB15); and to assess the impact of integrating blockchain validation and robust aggregation on system resilience and computational resource usage.

The research hypothesis suggests that integrating blockchain validation with robust aggregation and a node reputation system significantly reduces the effectiveness of poisoning and Sybil attacks while maintaining acceptable computational and communication overhead compared to traditional approaches.

E.S. Glumova, A.D. Filinskikh

Evaluation of the Semantic Consistency of Hierarchical Point Cloud Partitioning

Keywords: boundary precision; boundary recall; BVH; F1-measure; hierarchical partitioning; point cloud; data preprocessing; semantic consistency.

Abstract. The purpose of the paper is to develop and experimentally validate a methodology for assessing the semantic consistency of hierarchical point cloud partitioning obtained via adaptive BVH-partitioning. Task. The task is to quantitatively compare the boundaries of leaf blocks with ground truth semantic labels and to analyze the internal homogeneity of blocks at different granularity levels. Hypothesis. The modified SAH criterion, which accounts for local density and height inhomogeneities, yields partition boundaries that are better aligned with semantic transitions of the scene than conventional spatial subdivision schemes. Methods. The methodology relies on computing boundary recall (**BR**), boundary precision (**BP**), F1-score under varying spatial tolerance, as well as block purity and morphological features (linearity, planarity, sphericity). Experiments were carried out on the Paris section subset of the NPM3D/Paris-Lille-3D benchmark with semantic labels aggregated into four classes. Results. The BVH-partitioning achieved F1-scores of 0.625–0.627 at a tolerance of 0.6 m for granularity levels of 12, 40, and 100 blocks, outperforming KD-tree, Octree, and Voxel grid. Median

block purity increased from 0.787 to 0.991 with finer granularity, indicating reduced mixing of semantic classes.

A.V. Orekhov

Parametrization of Geometric Factors of FDM Extrusion in the APM FEM System during Modeling of the Stress-Strain State of Polymers under Axial Tension

Keywords: geometry parametrization; geometric discretization; finite element mesh; internal topology; APM FEM; FDM technologies; stress-strain state modeling.

Abstract. The paper addresses the challenge of digital lifecycle support for products manufactured via fused deposition modeling (**FDM**).

The research objective is to develop and experimentally verify a method for parameterizing the geometric factors of FDM extrusion within the APM FEM environment. This approach aims to enhance the accuracy of calculating the load-bearing capacity of local zones and structural elements under axial tension without excessively complicating the overall CAD geometry.

To achieve this objective, the following research tasks were formulated:

1) to develop parametric algorithms that link technological extrusion factors (layer thickness, infill configuration, and infill density) with the APM FEM finite element model;

2) to conduct physical mechanical axial tensile tests to evaluate the error of the developed digital models.

The research hypothesis assumes that idealizing the cross-section of the extruded filament into a rectangular shape eliminates topological singularities in interlayer contact zones and ensures stable generation of the APM FEM computational mesh without sacrificing simulation accuracy.

Methods: the study utilizes geometric modeling methods for regular mesh topologies within the KOMPAS-3D CAD system, alongside physical axial tensile testing of PLA polymer specimens performed on a universal testing machine.

The developed algorithms for direct parametric modeling based on slicer data provide detailed visualization of displacement fields and safety factors. The proposed solutions enable the simulation of internal geometry directly in the CAE environment using G-code. Validation of the developed mathematical models was carried out through a retrospective analysis of an experimental dataset accumulated at the Department of Structural Engineering between 2021 and 2025. The finite element modeling error relative to physical tests of ABS and PLA specimens does not exceed 10 % (9,89 % in the verification test), proving the stability of the proposed solutions.

S.V. Borisov, Yu.G. Nikishina

A Hybrid Digital Twin of a Slide Ball Bearing for Assessing Technical Condition Based on Vibration and Temperature Data

Keywords: vibration; condition diagnostics; wear; artificial intelligence; petrochemical engineering; plain bearing; temperature; friction; digital twin.

Abstract. A hybrid digital twin of a plain bearing is proposed, designed to monitor the technical condition of equipment in petrochemical production facilities. The method under study combines a physical model of wear and heat generation with a machine learning module that analyzes the obtained vibration and temperature data. The hypothesis of integrating known tribological patterns into the process of diagnosing pre emergency conditions makes it possible to compensate for the typical lack of labeled data in industry. The task of formalizing the wear process under variable loads and creating a classifier that uses spectral and statistical wear indicators in combination with the dynamics of bearing heating is being addressed. The linking of experimental and statistical estimates was carried out according to a late fusion scheme, where the contribution of each subsystem is adaptively recalculated depending on the reliability of the current measurements. This approach made it possible to reduce the likelihood of false diagnostic triggers, which is typical for statistical models, and to increase sensitivity

to the early stages of contact damage. Experimental studies using bench data that simulate lubricant contamination and temperature fluctuations confirmed the accuracy advantage of the hybrid approach over purely physical or purely statistical methods. As a result, a practical digital twin scheme has been developed, adapted to the conditions of petrochemical engineering. It has been demonstrated that the proposed solution ensures stable diagnostics across a wide range of operating modes and provides a foundation for implementing a condition based maintenance strategy. The results obtained confirm the potential of hybrid digital twins as a tool for improving equipment reliability in aggressive environments.

A.A. Zarukin, D.A. Zinchenko, V.A. Belyankin, D.A. Tretyakov

Adaptive Coordinated Feed Control System for a Three-Axis Machining Center with an X–Z–C Configuration

Keywords: adaptive control; common path coordinate; contour error; coordinated control; feed coordinator; recursive least squares; three-axis machining center; torque utilization.

Abstract. The aim of the study was to develop an adaptive coordinated feed control system for an X–Z–C machining center that limits torque utilization while preserving the path geometry. The objectives included constructing drive models, estimating the load and friction, and synthesizing cross-coupled correction and a common path-rate coordinator. The research hypothesis was that a common estimate of cutting resistance, used for disturbance compensation and path-rate adjustment, prevents drive saturation without disrupting axis coordination. The methods included a multi-channel recursive least-squares algorithm, predictive path-rate limiting, and numerical simulation of cone milling. The minimum path-rate factor was 0.7133, while the maximum torque utilization was 89.17 % against a limit of 90 %; no drive saturation occurred. The maximum and root-mean-square contour errors were 10.63 and 1.04 μm, respectively, and the cycle time was 191.42 s. The results support the hypothesis within the adopted model.

A.A. Zarukin, D.A. Zinchenko, D.A. Tretyakov

Dynamic Modeling of a Hybrid Manipulator with a Two-Axis Belt Drive Under In-phase/Antiphase Control and a Biaxial Tilting Unit

Keywords: belt drive; belt elasticity; dynamic modeling; hybrid manipulator; in-phase control; kinematic coupling; mathematical model; timing belt.

Abstract. The aim of this study is to develop and validate a hierarchy of mathematical models for a hybrid manipulator with a two-axis belt drive and a biaxial tilting unit. The objectives included deriving the sum-and-difference kinematics, comparing planar and spatial rotations, and accounting for belt elasticity. The hypothesis was that this hierarchy enables the separate evaluation of kinematic and elastic effects, while the solution of the elastic model approaches that of the rigid model as the dimensionless frequency parameter increases. The methods included matrix transformations, energy-based Jacobians, linearization of elastic constraints, and numerical simulation. At tilt angles of 20°, the discrepancy between M0 and M1 was 1.6501 mm, or 6.42 %. The maximum error of the elastic model decreased from 2.3296 % at $\Lambda = 20$ to 0.06356 % at $\Lambda = 100$, confirming the hypothesis within the adopted assumptions.

A.A. Zarukin, D.A. Zinchenko, D.A. Tretyakov

A Three-Axis Milling Center for Producing Positive Models of Lower-Limb Prosthetic Sockets

Keywords: cone milling; digital prosthetics; gypsum-free technology; positive model; prosthetic socket; three-axis center; torque load; trapezoidal profile.

Abstract. The aim of the study was to develop a specialized machining center for producing

positive models of prosthetic sockets. The objectives were to construct a dynamic model of the drives and simulate the milling process. The research hypothesis was that a common path coordinate ensures coordinated axis motion, while accounting for inertial, gravitational, and cutting-force components enables preliminary estimation of the required drive torques. The methods included kinematic analysis, Lagrange's equations, cutting-force calculation, and numerical simulation of a helical trajectory with a trapezoidal velocity profile. Relationships for the shaft angles, angular velocities, angular accelerations, and torques were obtained. For a cycle time of 180 s, the maximum X-, Z-, and C-axis torques were 0.00317, 0.11867, and 0.00736 N·m, respectively. It was established that the Z-axis load is governed mainly by gravity, whereas the C-axis load increases with the radius at which the cutting force acts.

D.A. Zinchenko, A.A. Zarukin, D.A. Tretyakov, A.M. Boryshnev

Development of a UAV Model and Control System in the MATLAB Simulink Environment

Keywords: mathematical model; MATLAB Simulink; multirotor dynamics; PID controller; quadrotor; simulation; unmanned aerial vehicle.

Abstract. The purpose of this study is to develop a computer model and a control system for a quadrotor unmanned aerial vehicle (**UAV**) designed for operations in confined spaces. The simulation was carried out using MATLAB Simulink. To achieve this objective, the following tasks were addressed: deriving a mathematical model of the UAV, determining the propeller thrust coefficient through analytical calculations and experiments, and designing a UAV model and control system based on a PID controller in Simulink. A closed set of nonlinear equations was obtained, relating the duty cycle of PWM control signals to the center-of-mass accelerations and body angular accelerations. Based on these equations, a cascade automatic control system was synthesized in MATLAB Simulink, in which the positioning loop is closed through the attitude angle and angular rate stabilization loops. Simulation confirms that coordinate commands are tracked without steady-state error.

D.A. Zyryanov, S.V. Solyony

The Rsr Algorithm for 8-connected Spaces: Modification and Efficiency Evaluation for Route Planning

Keywords: A-star algorithm; RSR algorithm; graph; dynamic obstacles; pathfinding; path planning; search space; symmetry reduction.

Abstract. Pathfinding in discretized space is a key task in mobile robot navigation and route construction on cell-based maps (e.g., obtained via SLAM). The most common solution remains the A* family of algorithms, whose efficiency depends on the representation of the search space. One direction for their acceleration is modifying the graph structure – the Rectangular Symmetry Reduction (**RSR**) method, which excludes nodes in obstacle-free areas from computation. Existing RSR implementations target 4-connected structures, while faster 8-connected structures remain uncovered, and known approaches poorly generalize to other n-connected topologies (hexagonal, three-dimensional), which determines the relevance of this study.

The aim of the work is to develop a modification of RSR for 8-connected spaces, scalable to arbitrary n-connected structures. Tasks: constructing a correct system of perimeter node connections; developing a mechanism for removing redundant boundary nodes; formally proving the correctness of the modifications; adapting the algorithm to dynamic obstacles; integrating it with A*; evaluating time complexity and comparative modeling of route-calculation speed.

Hypothesis: extending symmetry reduction to 8-connected spaces with redundant-node removal will reduce calculation time and stored data volume when reusing the graph, without loss of optimality, and the proposed principle applies to other n-connected structures as well.

Methods used include formal proofs, algorithmic modification of RSR, analytical complexity evaluation, and simulation modeling in Python.

The resulting RSR modification for 8-connected spaces was proven correct, showing significant reduction in calculation time and data volume with repeated graph use, and demonstrating applicability to hexagonal grids. Practical recommendations for algorithm choice are formulated. Practical significance lies in application to navigation systems of robotic complexes using n-connected cell maps.

A.S. Vorobyev, S.A. Lyubomudrov

Assessment of the Efficiency of Technical Preparation to Manufacture New Products under Pilot and Small-Batch Production Conditions

Keywords: metalworking; technical preparation of production; efficiency of production preparation; evaluation criterion; small-batch production; pilot production; product prototype.

Abstract. The paper presents the results of applying a methodology for assessing the technical preparation of production for new products in the context of pilot and small-batch production. The aim was to verify the feasibility of using a comprehensive production readiness indicator to make well-founded decisions on launching new products into production. To achieve this goal, the following tasks were set: to analyze the performance of the assembly and welding production at JSC "Kronstadt Marine Plant" for the period 2019–2025; to compare the indicators for manufacturing serial products and new items; to assess the technical readiness of the production; and to identify areas for its improvement. The hypothesis was that using a comprehensive readiness indicator would allow for a more accurate identification of deficiencies in design and technological preparation prior to the start of product manufacturing. The study employed methods of production performance analysis, comparative assessment of technical and economic indicators, statistical data processing, as well as calculations of productivity, labor intensity, material intensity, cost, and the comprehensive production readiness indicator. The results show that the proposed approach provides a quantitative assessment of the production's readiness level for mastering new products, enables timely identification of the need to adjust the design or technological process, and supports justification for the transition to serial production. Practical testing at an operating enterprise confirmed the applicability of the methodology for improving the efficiency of technical production preparation.

I.Y. Limochko, I.I. Solovev, I.V. Trifanov

Assessment of the Efficiency of Technical Preparation to Manufacture New Products under Pilot and Small-Batch Production Conditions

Keywords: digital modelling; machining accuracy; machining process planning; part deformation; rocket and space products; technological heredity; thin-walled part.

Abstract. The aim of the study is to develop a procedure for designing a machining process for thin-walled housing parts based on the formalized selection of a process analogue. The objectives are to substantiate the criteria for selecting a process analogue; to determine the rules for repeated use of process modules; to link process route design with calculation of intermediate stiffness and deformation; to compare the initial and proposed processes. The hypothesis suggests that evaluating part similarity using normalized design and manufacturing features, recalculating machining allowances and workholding parameters, and analyzing elastic displacements before issuing the NC program reduce process-planning labor and part distortion. Methods included design and manufacturing classification, dimensional analysis, variant-based process planning, finite element analysis, and computational comparison of machining routes. Results obtained: process-planning labor was reduced by 35.5 %, the number of setups by 33.3 %, machining time by 16.9 %, and the maximum form deviation from 0.39 to 0.22 mm (by 43.6 %). The hypothesis was confirmed within the computational experiment; shop-floor validation is required for final verification.

I.N. Khrustaleva, L.G. Chernykh, S.N. Stepanov, S.S. Stepanov

Model for Optimization of Mechanical Machining Process Parameters

Keywords: shaping; structural hierarchical model; Pareto-optimization; technological route; technological transition; working stroke; multi-criteria optimization.

Abstract. This paper presents the structure of a comprehensive hierarchical model for optimizing the machining process. Based on the structural elements of the processes, an integrated model of integrated optimization of the technological process of mechanical processing is formed, containing six levels of control. For each control level, vector optimization criteria, many control parameters are formed, and optimization criteria are determined. Multi-criteria optimization is based on the Pareto optimization method. The purpose of the study is to increase the efficiency of technological preparation of production in terms of the development of technological processes of mechanical processing due to their structural and parametric optimization.

In order to achieve the set goal of the study, the following tasks were set: carrying out a structural analysis of the investigated process and determining its structural elements; development of a hierarchical model for control of parameters of the investigated process based on its structural decomposition; analytical formalization of structural elements of the investigated process forming the corresponding control level. The object of research is the technological process of mechanical processing. The paper presents the results of comprehensive optimization of the technological process of mechanical processing of the "Bushing" product, which made it possible to increase the quality of surface texture in terms of the Rz parameter by more than 15 %, while the total labor intensity of the process and the value of operating costs increased by 11.9 % and 13.2 %, respectively.

S.E. Maltsev, A.A. Romanov

Integrated Mechanism for Prioritizing and Using Production Capacity Reserves

Keywords: production capacity; production capacity reservation; prioritization; production system resilience.

Abstract. This article examines the problem of increasing the resilience of industrial production systems through capacity redundancy. An integrated mechanism is proposed that combines a methodology for determining redundancy priorities with organizational and technical procedures for the formation, maintenance, and use of reserves. The mechanism includes analytical, organizational, technical, and operational components, interconnected by feedback. It is shown that it is appropriate to consider production capacity reserves not as unused production potential, but as the organizationally and technically prepared ability of a production system to compensate for a deficit in primary capacity.

Yu.L. Maslennikova

Management of Unplanned Orders in Pilot Production

Keywords: pilot production; unscheduled order; operational planning; prioritization; sustainability; interval planning.

Abstract. The objective is to develop a set of tools for operational management of unscheduled orders in pilot production (**PP**). The tasks are multi-criteria prioritization of orders (**TOPSIS**), assessment of production structure stability, interval forecasting of technological operation durations based on mixed probability distributions, and algorithmic formalization of management in BPMN 2.0 notation. The hypothesis is that the integration of the proposed tools ensures increased validity of management decisions under the stochastic nature of PP by comprehensively accounting for duration uncertainty, technological costs, and criterion-based significance of orders. Methodology is based on the apparatus of multi-criteria analysis, economic-mathematical modeling, probability theory, and

process modeling. Results: a management algorithm has been developed and formalized, incorporating prioritization, stability assessment, and interval planning tools, enabling the formation of time buffers and order ranking based on priorities.

A.G. Nikolaeva, A.S. Tsvetkov, V.M. Kondratieva

Development of A Quality Control System for Hydrogen Fuel Transportation Pipes

Keywords: enterprise; new quality control methods; production cycle of pipe steels.

Abstract. The objective of this study is to substantiate the feasibility of implementing an accelerated hydrogen embrittlement testing method for carbon steels as part of industrial quality control for tubular products. The objectives of the study are to identify the strengths, weaknesses, and threats associated with implementing the developed method in a plant laboratory. The research hypothesis is that the developed accelerated testing method enables reliable assessment of the susceptibility of pipe steels to hydrogen embrittlement while significantly reducing test duration and can be implemented in plant laboratories without significant organizational and technical changes. To address these objectives, a strategic assessment method such as SWOT analysis was used. The study demonstrated that the practical application of the developed method reduces the time and scope of autoclave testing of steels in third-party specialized laboratories used to qualify materials for use in hydrogen fuel transportation systems.

A.A. Sofronov, V.V. Bulatov

Analysis of Contemporary Software Tools for Technical System Reliability Assessment

Keywords: software; reliability calculation; reliability; reliability of technical systems; fault trees; event trees; Markov chain; reliability block diagram.

Abstract. The article presents a comparative analysis of software systems for calculating the reliability of technical systems. The objective of the research is to analyze software complexes for calculating the reliability of technical systems. The tasks include examining the main differences, as well as the advantages and disadvantages regarding the analytical capabilities of each system and compiling a comparative matrix of functional capabilities. The primary hypothesis assumes that domestic and alternative foreign technical systems are comparable in functional capabilities and support for reliability calculation standards. The research methods employed include a review and comparative analysis of technical and scientific literature. The study resulted in a comparison of domestic and foreign products in terms of functional capabilities and standards support. The study identified the main differences between software systems: domestic complexes are oriented toward solving industry-specific tasks taking into account the national regulatory framework, while foreign systems focus on universal applicability and a wide range of analytical capabilities.

A.Yu. Tumanov, E.V. Ivanov

Evolution of Quality Systems and Modeling Methods in the Industry Concept (2.0–6.0) of High-Tech Production

Keywords: system dynamics; QMS; Industry 4.0; Industry 5.0; Industry 6.0; Quality 4.0; Forrester's method; PAF model; production sustainability; digital twin.

Abstract. The purpose of the study was to analyze the evolution of quality models and methods and develop theoretical provisions based on it for creating predictive digital counterparts of QMS, ensuring continuous adaptive stability and optimizing the functional costs of high-tech industries in the context of changing technological patterns.

The object of the research was the quality management systems (**QMS**) of high-tech industries

operating in conditions of changing technological patterns and subject to dynamic environmental influences.

The subject of the research was theoretical and methodological principles, mathematical models and tools of system dynamics that determine the evolution of quality systems, as well as patterns of predictive sustainability management and functional costs.

E.V. Lyapuntsova, V.B. Chechnev

Adaptive Tool for Generating and Selecting Alternative Work Plans in Small-Batch Production

Keywords: adaptive adjustment; alternative plan; decision support system; genetic algorithm; multi-criteria ranking; small-batch production; work planning.

Abstract. The article considers an adaptive tool for generating and selecting alternative work plans at small-batch production enterprises. The proposed tool is intended to support managerial decision-making when distributing labor input among operations, employees, and planning periods. Its computational loop includes generation of local alternatives using a genetic algorithm, filtering of infeasible and structurally similar solutions, multi-criteria ranking based on ELECTRE III and PROMETHEE II, and adjustment of parameters using calculation results and decision-maker feedback. It is shown that separating hard constraints and evaluation criteria makes it possible to exclude employee overloads before ranking, while adaptive adjustment increases the diversity of alternatives presented for managerial choice.

K.S. Shchekotova, E.P. Rostova

Development of a Game-Theoretic Model for Software Implementation Amidst Institutional Resistance

Keywords: agency relationship models; non-cooperative games; digital educational environment; Administration – Academic Staff model; institutional resistance; player utility function; information asymmetry; software efficiency.

Abstract. The current stage of higher education development is characterized by large-scale digitalization and the formation of complex educational ecosystems, in which a significant role is played by software and the timeliness of its adaptation to external environmental requirements. The article examines the software implementation process in the context of institutional resistance. To formalize the process under analysis, the authors propose a game-theoretic model. It is a non-cooperative, two-player, non-zero-sum game played under conditions of complete but imperfect information. The interaction between the university "Administration" and the "Academic Staff" is modeled as the game between the players.

The aim of this paper is to determine the optimal behavior of participants within the university's digital educational environment to reach a compromise amidst a conflict of interests. The research aims to examine approaches to modeling various scenarios for evaluating software effectiveness within a university setting. It also involves analyzing potential behavioral strategies of various stakeholders in specific game scenarios and formulating models of their target preferences.

The research hypothesis is that econometric modeling of various conflict situations, utilizing game theory, serves as an effective tool for assessing the likelihood of institutional resistance.

The research methods employed include modeling techniques and game theory.

Results achieved. A model for software implementation amidst institutional resistance has been proposed, involving two players: university administration and academic staff. The proposed model enhances the soundness of management decisions regarding the evaluation and selection of software within a university's digital educational environment under conditions of information asymmetry.

D.D. Yartsev

Fuzzy Nature-Based Method for Budget Allocation between Applicant Attracting Channels

Keywords: conditional optimization; nature-based algorithm; budget allocation for attracting applicants; Crow search algorithm; fuzzy set theory.

Abstract. The use of a portfolio approach in organizing core activities requires the use of mass recruitment of personnel to provide staffing for project implementation. A key stage of this type of recruitment is finding and attracting candidates for multiple open positions. The aim of the article is to develop a method for distributing funds allocated for the search for specialists between recruitment channels, taking into account the characteristics of mass recruitment and a set of resource constraints. To achieve this, an analysis of conditional multivariate optimization methods was conducted. Its results led to the selection of a nature-based Crow Search Algorithm, which models the foraging behavior of crows in terms of stockpiling. It was modified by introducing elements of fuzzy set theory to account for information imperfections and improve the convergence rate of the optimization algorithm. Using fuzzy inference to calculate the method's free parameters will allow for faster balancing between local and global searches and selecting an acceptable solution, taking all constraints into account. Performing operations on fuzzy sets that define conversion estimates in the recruitment funnel will allow taking into account the lack of high-quality information about acquisition channels.

L.V. Gorshkova

Analysis of the Provision of Medical Care to the Population of Russia: A Regional Aspect

Keywords: provision of medical care; regional healthcare; resource provision; regions of Russia; healthcare efficiency.

Abstract. The relevance of studying the availability of healthcare to the population is determined by the growing proportion of the elderly population, which increases the burden on the healthcare system, significant differences in the availability of healthcare depending on the region, and a shortage of doctors and nurses, especially in the cases of the primary care and rural areas. Availability of healthcare directly determines the timeliness of diagnosis, the effectiveness of treatment, and, consequently, public health indicators (morbidity, disability, mortality). The objective of the study is to analyze the resource provision of healthcare organizations in Russian regions and based on this, determine the availability of healthcare. The research tasks are to identify trends in the resource provision of the healthcare system on average for Russia and by region; to assess the impact of factors on the availability of healthcare. Research hypothesis was to identify the most significant factors influencing the availability of healthcare resources. Methods used included comparative and correlation analysis. Based on the study results, the factors most significantly influencing the availability of healthcare were identified.

T.I. Kuznetsova

Industrial Marketplaces as Drivers of Digital Transformation of an Enterprise's Production System in Crisis Conditions

Keywords: B2B platform; marketplace as an ecosystem; technological integration; fulfillment; drone delivery; certificate of compliance; shop-in-shop principle.

Abstract. In the context of external environment turbulence, there is a steady trend of industrial enterprises transitioning to the use of B2B platforms as a tool for optimizing sales and procurement processes. However, the practice of implementing such solutions is associated with a number of institutional barriers: strict limits on the implementation of complex large-tonnage equipment, requirements for the disclosure of internal accounting information, and risks of leakage of important

commercial information. These circumstances necessitate an in-depth analysis of the functionality of industrial marketplaces. The purpose of this work is to develop an adaptive strategy for the behavior of engineering enterprises on digital marketplaces. The scope of tasks includes assessing the potential of B2B platforms for automating reproduction processes, identifying the balance of advantages and limitations for counterparties, systematizing risks and transaction regulations, reviewing the specifics of leading Russian and foreign solutions, and developing practical recommendations for improving the efficiency of enterprises in the digital environment.

I.E. Belskikh, K.V. Markelov

Bond Strategies for Financing Innovations at Various Stages of the Company Life Cycle in the Domestic Market

Keywords: company life cycle; innovation financing; bond strategies; domestic market.

Abstract. The subject of the research is the processes of managing the bond financing of company innovations at different stages of the life cycle. The purpose of this article is to search for and study bond financing of innovations as a basis for ensuring the development of a company in the domestic market in different periods of its life cycle.

Theoretical and methodological foundations include the analysis of research materials by cyclic, expert and system analysis methods.

The application of the obtained results is advisable in the field of forming the practice of financing innovations when using bond strategies aimed at developing a company at different stages of its life cycle. A choice of strategy was formed depending on the innovative and sectoral financing objectives.

A.A. Aronchikov, A.V. Kudryavtseva

Organizational Aspects of Economic Training in an Innovative Company

Keywords: innovation; training; algorithms; innovative company; audit.

Abstract. The purpose of this article is to develop systemic measures to optimize the process of economic training. The objectives include analyzing the algorithm for decision-making on training, considering issues related to educational content for economic training, and analyzing the audit of corporate training. The research hypothesis is that corporate training drives a company's innovative development. Research methods include comparative analysis, expert assessment, in-depth interviews, and algorithmization. The main result of the conducted research is a practical tool for implementing a corporate training algorithm.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
List of Authors

Т.Ю. ВОЙТЕНКО кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных и технических систем филиала Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Лесосибирск **E-mail:** tat-voitenko@yandex.ru	**T.YU. VOITENKO** Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Information and Technical Systems, Lesosibirsk Branch of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Lesosibirsk **E-mail:** tat-voitenko@yandex.ru
Е.А. КИРИЛЛОВСКИЙ студент филиала Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Лесосибирск **E-mail:** egor_egorka2002@mail.ru	**E.A. KIRILLOVSKY** Student, Lesosibirsk Branch of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Lesosibirsk **E-mail:** egor_egorka2002@mail.ru
А.В. ФИРЕР кандидат педагогических наук, доцент кафедры высшей математики, информатики и естествознания Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета, г. Лесосибирск **E-mail:** fivr@yandex.ru	**A.V. FIRER** Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Informatics, and Natural Sciences, Lesosibirsk Pedagogical Institute (Branch of Siberian Federal University), Lesosibirsk **E-mail:** fivr@yandex.ru
М.К. ГАЛОВА студент Кубанского государственного университета, г. Краснодар **E-mail:** galovamaria0410@gmail.com	**M.K. GALOVA** Student, Kuban State University, Krasnodar **E-mail:** galovamaria0410@gmail.com
К.С. КОРОТКОВ доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики и нанотехнологии Кубанского государственного университета, г. Краснодар **E-mail:** galovamaria0410@gmail.com	**K.S. KOROTKOV** Doctor of Engineering, Professor, Department of Radiophysics and Nanotechnology, Kuban State University, Krasnodar **E-mail:** galovamaria0410@gmail.com
А.В. ГОЛАН ассистент Кубанского государственного университета, г. Краснодар **E-mail:** blazepro17@gmail.com	**A.V. GOLAN** Lecturer, Kuban State University, Krasnodar **E-mail:** blazepro17@gmail.com
Т.А. СТЕПАНОВА студент Кубанского государственного университета, г. Краснодар **E-mail:** margota5007@gmail.com	**T.A. STEPANOVA** Student, Kuban State University, Krasnodar **E-mail:** margota5007@gmail.com

Ю.А. ИЗВЕКОВ
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: yurij.izvekov@mail.ru

YU.A. IZVEKOV
Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of Department of Applied Mathematics and Informatics, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: yurij.izvekov@mail.ru

К.О. СВЕТУС
ассистент кафедры прикладной математики и информатики Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: krisstyushac@mail.ru

K.O. SVETUS
Lecturer, Department of Applied Mathematics and Informatics, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: krisstyushac@mail.ru

В.О. КРАЙНЯЯ
студент Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: viktoriakrajnaa05@gmail.com

V.O. KRAYNYAYA
Student, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: viktoriakrajnaa05@gmail.com

К.Д. ВАЛЕЕВА
студент Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: karina.valeeva.1992@list.ru

K.D. VALEEVA
Student, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: karina.valeeva.1992@list.ru

Н.К. КАЗАКОВ
магистрант, лаборант-исследователь Научного центра мирового уровня «Интеллектуальные беспилотные авиационные системы» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара
E-mail: kaznkazer@gmail.com

N.K. KAZAKOV
Master’s student, Research Laboratory Assistant, World-Class Research Center "Intelligent Unmanned Aerial Systems," Samara National Research University (Samara University), Samara
E-mail: kaznkazer@gmail.com

Н.А. ИВЛИЕВ
кандидат технических наук, доцент кафедры киберфотоники Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара
E-mail: ivliev.na@ssau.ru

N.A. IVLIEV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Cyber-Photonics, Samara National Research University (Samara University), Samara
E-mail: ivliev.na@ssau.ru

А.В. КОСТИНЕВИЧ
студент Пензенского государственного университета, г. Пенза
E-mail: andreykoccc@gmail.com

A.V. KOSTINEVICH
Student, Penza State University, Penza
E-mail: andreykoccc@gmail.com

В.В. КОСТИНЕВИЧ
кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Пензенского государственного университета, г. Пенза
E-mail: kostinevich@mail.ru

V.V. KOSTINEVICH
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Penza State University, Penza
E-mail: kostinevich@mail.ru

А.П. МЕДВЕДЕВ
преподаватель, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск
E-mail: medvedeff.a.p@yandex.ru

A.P. MEDVEDEV
Lecturer, postgraduate student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk
E-mail: medvedeff.a.p@yandex.ru

В.В. ОСТРОВСКИЙ
магистрант института информатики и телекоммуникаций Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: v7ktory@gmail.com

V.V. OSTROVSKII
Master's student, Institute of Informatics and Telecommunications, M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
E-mail: v7ktory@gmail.com

М.Г. ДОРРЕР
кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: mdorrer@mail.ru

M.G. DORRER
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Information and Control Systems, M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
E-mail: mdorrer@mail.ru

А.А. САВИНОВ
аспирант Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара
E-mail: mr.andrew111@yandex.ru

A.A. SAVINOV
Postgraduate Student, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara
E-mail: mr.andrew111@yandex.ru

А.Г. СОЛОДОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры ИРС Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара
E-mail: sag_samara@mail.ru

A.G. SOLODOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara
E-mail: sag_samara@mail.ru

О.А. ТОРШИНА
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: olganica@mail.ru

O.A. TORSHINA
Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Informatics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: olganica@mail.ru

В.И. ГОРБАТОВ
студент Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: vovangorynych@gmail.com

V.I. GORBATOV
Student, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: vovangorynych@gmail.com

А.Ф. МУСТАФИН
аспирант Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск
E-mail: airatmustafin@mail.ru

A.F. MUSTAFIN
Postgraduate Student, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
E-mail: airatmustafin@mail.ru

С.Б. КАРИМОВ архитектор банковских информационных систем, г. Бишкек **E-mail:** nauka-bisnes@mail.ru	**S.B. KARIMOV** Banking Information Systems Architect, Bishkek **E-mail:** nauka-bisnes@mail.ru
О.В. ВОРОНКОВА доктор экономических наук, профессор Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург **E-mail:** nauka-bisnes@mail.ru	**O.V. VORONKOVA** Doctor of Economics, Professor, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg **E-mail:** nauka-bisnes@mail.ru
А.В. МАНСУРОВ кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности Алтайского государственного университета, г. Барнаул **E-mail:** mansurov.alex@gmail.com	**A.V. MANSUROV** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Information Security, Altai State University, Barnaul **E-mail:** mansurov.alex@gmail.com
Н.Н. МИНАКОВА доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационной безопасности Алтайского государственного университета, г. Барнаул **E-mail:** minakova@phys.asu.ru	**N.N. MINAKOVA** Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Information Security, Altai State University, Barnaul **E-mail:** minakova@phys.asu.ru
В.В. ЖУРАВЛЕВА преподаватель кафедры информационной безопасности Алтайского государственного университета, г. Барнаул **E-mail:** torinka8@gmail.com	**V.V. ZHURAVLEVA** Lecturer, Department of Information Security, Altai State University, Barnaul **E-mail:** torinka8@gmail.com
А.А. ЛЕПЕНДИН кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационной безопасности Алтайского государственного университета, г. Барнаул **E-mail:** andrey.lependin@gmail.com	**A.A. LEPENDIN** Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Information Security, Altai State University, Barnaul **E-mail:** andrey.lependin@gmail.com
А.П. ВАРАНКИН студент Алтайского государственного университета, г. Барнаул **E-mail:** varankin.artem1@gmail.com	**A.P. VARANKIN** Student, Altai State University, Barnaul **E-mail:** varankin.artem1@gmail.com
М.А. СИДОРОВИЧ кандидат технических наук, старший преподаватель Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск **E-mail:** msidorovich60@gmail.com	**M.A. SIDOROVICH** Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk **E-mail:** msidorovich60@gmail.com
С.А. ПРИХОДЬКО аспирант, преподаватель Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск **E-mail:** p-s-a@mail.ru	**S.A. PRIKHODKO** Postgraduate Student, Lecturer, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk **E-mail:** p-s-a@mail.ru

М.А. ПОПОВ
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой цифровой индустрии и защиты информации Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск
E-mail: main79@mail.ru

M.A. POPOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Digital Industry and Information Protection, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
E-mail: main79@mail.ru

Ю.В. ПОНОМАРЧУК
кандидат физико-математических наук, PhD, директор Института транспортных и энергетических систем Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск
E-mail: yulia.ponomarchuk@gmail.com

YU.V. PONOMARCHUK
Candidate of Science (Physics and Mathematics), PhD, Director of the Institute of Transport and Energy Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
E-mail: yulia.ponomarchuk@gmail.com

С.С. ШИПУЛИН
аспирант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: profi.social@gmail.com

S.S. SHIPULIN
Postgraduate student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: profi.social@gmail.com

С.В. БЕЗЗАТЕЕВ
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой киберфизических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: profi.social@gmail.com

S.V. BEZZATEEV
Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of Department of Cyber-Physical Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: profi.social@gmail.com

Е.С. ГЛУМОВА
старший преподаватель кафедры графических информационных систем Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород
E-mail: glumova.ek@yandex.ru

E.S. GLUMOVA
Senior Lecturer, Department of Graphic Information Systems, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod
E-mail: glumova.ek@yandex.ru

А.Д. ФИЛИНСКИХ
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой графических информационных систем Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород
E-mail: fad@nntu.ru

A.D. FILINSKIKH
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of Department of Graphic Information Systems, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod
E-mail: fad@nntu.ru

А.В. ОРЕХОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Костромской государственной сельскохозяйственной академии, пос. Караваево
E-mail: orexov1975@mail.ru

A.V. OREKHOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Structural Engineering, Kostroma State Agricultural Academy, Karavaevo settlement
E-mail: orexov1975@mail.ru

С.В. БОРИСОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования и прикладной механики Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Казань
E-mail: BorisovSV@corp.knrtu.ru

S.V. BORISOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Design Fundamentals and Applied Mechanics, Kazan National Research Technological University, Kazan
E-mail: BorisovSV@corp.knrtu.ru

Ю.Г. НИКИШИНА
кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования и прикладной механики Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Казань
E-mail: NikishinaYuG@corp.knrtu.ru

YU.G. NIKISHINA
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Design Fundamentals and Applied Mechanics, Kazan National Research Technological University, Kazan
E-mail: NikishinaYuG@corp.knrtu.ru

А.А. ЗАРУКИН
магистрант Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: artzarukin@gmail.com

A.A. ZARUKIN
Master's student, Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: artzarukin@gmail.com

Д.А. ЗИНЧЕНКО
магистрант Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: danil.zinchencko@yandex.ru

D.A. ZINCHENKO
Master's student, Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: danil.zinchencko@yandex.ru

В.А. БЕЛЯНКИН
магистрант Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: belyankin.vyacheslav@yandex.ru

V.A. BELYANKIN
Master's student, Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: belyankin.vyacheslav@yandex.ru

Д.А. ТРЕТЬЯКОВ
кандидат технических наук, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: tretyakov_da@spbstu.ru

D.A. TRETYAKOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: tretyakov_da@spbstu.ru

А.М. БОРЫШНЕВ
магистрант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: boryshnevam@yandex.ru

A.M. BORYSHNEV
Master's student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: boryshnevam@yandex.ru

Д.А. ЗЫРЯНОВ
студент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: zyrikdima@gmail.com

D.A. ZYRYANOV
Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: zyrikdima@gmail.com

С.В. СОЛЕНЫЙ
кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: zyrikdima@gmail.com

S.V. SOLYONY
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: zyrikdima@gmail.com

А.С. ВОРОБЬЕВ
аспирант кафедры технологии машиностроения Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: vas_piter@mail.ru

A.S. VOROBYEV
Postgraduate student, Department of Mechanical Engineering Technology, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: vas_piter@mail.ru

С.А. ЛЮБОМУДРОВ
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

S.A. LYUBOMUDROV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of Department of Mechanical Engineering Technology, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

И.Ю. ЛИМОЧКО
магистр, выпускник Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: limochko.igor@yandex.ru

I.YU. LIMOCHKO
Master's degree holder, graduate of M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
E-mail: limochko.igor@yandex.ru

И.И. СОЛОВЬЕВ
магистр, выпускник Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: ilya.solovev.1988@inbox.ru

I.I. SOLOVEV
Master of Science, graduate of M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
E-mail: ilya.solovev.1988@inbox.ru

И.В. ТРИФАНОВ
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического регулирования и метрологии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: trifanov@sibsau.ru

I.V. TRIFANOV
Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Technical Regulation and Metrology, M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
E-mail: trifanov@sibsau.ru

И.Н. ХРУСТАЛЕВА
доцент Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

I.N. KHRUSTALEVA
Associate Professor, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

Л.Г. ЧЕРНЫХ
доцент Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: 2904180@mail.ru

L.G. CHERNYKH
Associate Professor, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: 2904180@mail.ru

С.С. СТЕПАНОВ
доцент Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: stepanov.sergey.koi@gmail.com

S.S. STEPANOV
Associate Professor, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: stepanov.sergey.koi@gmail.com

С.Е. МАЛЬЦЕВ
аспирант АНО ДПО «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» имени академика В.П. Ефремова», г. Москва
E-mail: sj_73@mail.ru

S.E. MALTSEV
Postgraduate Student, Academician V.P. Efremov Scientific and Educational Center for Aerospace Defense "Almaz-Antey" (ANO DPO), Moscow
E-mail: sj_73@mail.ru

А.А. РОМАНОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск
E-mail: romanov73@gmail.com

A.A. ROMANOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Information Systems, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk
E-mail: romanov73@gmail.com

Ю.Л. МАСЛЕННИКОВА
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной логистики Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва
E-mail: Maslennikova.yuliya@yandex.ru

YU.L. MASLENNIKOVA
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow
E-mail: Maslennikova.yuliya@yandex.ru

А.Г. НИКОЛАЕВА
инженер-исследователь Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: nikolaeva_ag@spbstu.ru

A.G. NIKOLAEVA
Research Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: nikolaeva_ag@spbstu.ru

А.С. ЦВЕТКОВ
кандидат технических наук, заведующий испытательной лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: tsvetkov_as@spbstu.ru

A.S. TSVETKOV
Candidate of Science (Engineering), Head of Testing Laboratory, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: tsvetkov_as@spbstu.ru

В.М. КОНДРАТЬЕВА
инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург
E-mail: kondratieva_vm@spbstu.ru

V.M. KONDRATIEVA
Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
E-mail: kondratieva_vm@spbstu.ru

А.А. СОФРОНОВ
аспирант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: sofronovalexx21@gmail.com

A.A. SOFRONOV
Postgraduate student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: sofronovalexx21@gmail.com

В.В. БУЛАТОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

V.V. BULATOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

А.Ю. ТУМАНОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: toumanov@mail.ru

A.YU. TUMANOV
Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Metrological Support for Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: toumanov@mail.ru

Е.В. ИВАНОВ
аспирант кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
E-mail: makler-89@mail.ru

E.V. IVANOV
Postgraduate student, Department of Metrological Support for Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg
E-mail: makler-89@mail.ru

Е.В. ЛЯПУНЦОВА
доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: lev86@bmstu.ru

E.V. LYAPUNTSOVA
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow
E-mail: lev86@bmstu.ru

В.Б. ЧЕЧНЕВ аспирант Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва **E-mail:** gegrev@yandex.ru	**V.B. CHECHNEV** Postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow **E-mail:** gegrev@yandex.ru
К.С. ЩЕКОТОВА аспирант, исполняющий обязанности начальника управления по работе с абитуриентами, преподаватель Поволжского государственного университета сервиса, г. Тольятти **E-mail:** ksen.prokopowa@yandex.ru	**K.S. SHCHEKOTOVA** Postgraduate student, Acting Head of Admissions Department, Lecturer, Volga Region State University of Service, Tolyatti **E-mail:** ksen.prokopowa@yandex.ru
Е.П. РОСТОВА доктор экономических наук, доцент, научный руководитель Поволжского государственного университета сервиса, г. Тольятти **E-mail:** el_rostova@mail.ru	**E.P. ROSTOVA** Doctor of Economics, Associate Professor, Academic Supervisor at Volga Region State University of Service, Tolyatti **E-mail:** el_rostova@mail.ru
Д.Д. ЯРЦЕВ аспирант «Росинформагротех», р.п. Правдинский **E-mail:** yarcevdd@me.com	**D.D. YARTSEV** Postgraduate student, Rosinformagrotech, Pravdinsky **E-mail:** yarcevdd@me.com
Л.В. ГОРШКОВА кандидат экономических наук, доцент кафедры мировой экономики и таможенной статистики Российской таможенной академии, г. Люберцы **E-mail:** l.gorshkova@customs-academy.ru	**L.V. GORSHKOVA** Candidate of Science (Economics), Associate Professor at the Department of World Economy and Customs Statistics, Russian Customs Academy, Lyubertsy **E-mail:** l.gorshkova@customs-academy.ru
Т.И. КУЗНЕЦОВА кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и бизнеса Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва **E-mail:** kuznetsovati@bmstu.ru	**T.I. KUZNETSOVA** Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Economics and Business, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow **E-mail:** kuznetsovati@bmstu.ru
И.Е. БЕЛЬСКИХ доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и финансов Волгоградского филиала Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, г. Волгоград **E-mail:** pr-ib@yandex.ru	**I.E. BELSKIKH** Doctor of Economics, Professor, Department of Economics and Finance, Volgograd Branch of G.V. Plekhanov Russian University of Economics, Volgograd **E-mail:** pr-ib@yandex.ru
К.В. МАРКЕЛОВ аспирант кафедры экономики и финансов Волгоградского филиала Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, г. Волгоград **E-mail:** pr-ib@yandex.ru	**K.V. MARKELOV** Postgraduate Student, Department of Economics and Finance, Volgograd Branch of G.V. Plekhanov Russian University of Economics, Volgograd **E-mail:** pr-ib@yandex.ru

А.А. АРОНЧИКОВ
магистрант Российского университета транспорта, г. Москва
E-mail: anatoly.aronchikov@gmail.com

A.A. ARONCHIKOV
Master's student, Russian University of Transport, Moscow
E-mail: anatoly.aronchikov@gmail.com

А.В. КУДРЯВЦЕВА
доцент кафедры управления инновациями на транспорте Российского университета транспорта, г. Москва
E-mail: anastasiya.izmaykova@mail.ru

A.V. KUDRYAVTSEVA
Associate Professor, Department of Transport Innovation Management, Russian University of Transport, Moscow
E-mail: anastasiya.izmaykova@mail.ru

НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ
SCIENCE AND BUSINESS: DEVELOPMENT WAYS
№ 8(182) 2026
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Подписано в печать 23.08.2026 г.
Формат журнала 60×84/8
Усл. печ. л. 34,13. Уч.-изд. л. 17,22.
Тираж 1000 экз.
Цена 350 руб.

ООО «НТФ РИМ».