Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе

Всероссийская научно-техническая конференция

(Калуга, 11–13 ноября 2025 года)

Материалы конференции

В двух томах

Том 1

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2026

УДК 378:001.891
ББК 74.48:72
Н34

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8562/

Руководители оргкомитета конференции:

А.В. Полюлях (директор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана),
Е.В. Вершинин (зам. директора по научной работе)

Оргкомитет конференции:

председатель оргкомитета *Е.В. Вершинин*,
ученый секретарь *В.В. Лебедев*

Члены оргкомитета:

Перерва О.Л., д-р экон. наук, профессор
Мазин А.В., д-р техн. наук, доцент
Рамазанов А.К., канд. физ.-мат. наук, доцент
Шафигуллина Т.В., канд. ист. наук, доцент
Анфилов К.Л., канд. хим. наук, доцент
Малышев Е.Н., канд. техн. наук, доцент
Мельников Д.В., канд. техн. наук, доцент
Гагарин Ю.Е., канд. физ.-мат. наук, доцент
Пономарев А.И., канд. техн. наук, доцент
Витчук П.В., канд. техн. наук, доцент
Максимов А.В., канд. техн. наук, доцент
Сломинская Е.Н., канд. техн. наук, доцент
Труханов К.Ю., канд. техн. наук, доцент
Жинов А.А., канд. техн. наук, доцент
Пащенко В.Н., канд. техн. наук, доцент
Кусачева С.А., канд. биол. наук, доцент
Белова Е.В., канд. филол. наук, доцент

Н34 **Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе** : Всероссийская научно-техническая конференция (Калуга, 11–13 ноября 2025 года) : материалы конференции : в 2 т. / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026.

ISBN 978-5-7038-6768-6
Т. 1. — 663, [1] с. : ил.
ISBN 978-5-7038-6863-8

В материалах Всероссийской научно-технической конференции представлены результаты научных исследований, выполненных учеными в течение ряда лет. Систематизированы материалы различных научных школ. Результатами научных исследований являются новые методы, вносящие вклад в развитие теории, а также прикладные задачи, воплощенные в конструкциях и материалах. В первый том сборника вошли материалы секций 1–11.

УДК 378:001.891
ББК 74.48:72

Издается в авторской редакции.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

ISBN 978-5-7038-6863-8 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-6768-6

Секция 1. Прогрессивные технологии, оборудование и инструментальные системы в машиностроении

УДК 621

Оптимизация применения производственных мощностей в современной промышленности

Бысов Сергей Александрович bysov.s@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены актуальные проблемы эффективного использования производственных мощностей в современных условиях промышленного производства. Проанализированы структурные изменения, происходящие в современной промышленности. Представлен анализ существующих проблем в использовании производственного оборудования. Показаны экономические последствия нерационального использования производственных мощностей. Сделаны выводы о том, что комплексное решение проблемы эффективного использования производственных мощностей требует изменения подходов к организации производства. Полученные результаты могут применяться для оптимизации производственных процессов в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: *производственные мощности, технологическое оборудование, эффективность производства, оптимизация загрузки, модернизация производства*

В современных условиях промышленного производства наблюдается стремительное сокращение жизненного цикла продукции. В машиностроительной отрасли требуется полная модернизация производственных линий каждые 3–5 лет, что обусловлено необходимостью постоянного обновления технологической базы [1]. Данная тенденция обусловлена не только техническим прогрессом, но и постоянно меняющимися требованиями рынка, что делает вопрос эффективного использования производственных мощностей особенно актуальным.

Современная промышленность претерпевает существенные структурные изменения. Прежде всего, происходит значительное сокращение удельного веса традиционного массового производства. На смену длительному выпуску однотипной продукции приходит многономенклатурное производство, способное одновременно выпускать несколько разновидностей изделий и быстро переходить на выпуск новой продукции.

Параллельно сокращается доля единичного и мелкосерийного производства благодаря развитию стандартизации и унификации. Однако в отечественной практике этот тип производства все еще составляет около трети объема машиностроения, что существенно выше показателей развитых стран [2].

Анализ производственной деятельности показывает, что существует ряд существенных проблем в использовании производственных мощностей: низкий коэффициент использования технологического оборудования, значительные издержки на содержание невостребованного оборудования, неэффективное использование производственных площадей.

Особенно остро эти проблемы проявляются в единичном производстве, где широкоуниверсальное оборудование задействуется лишь на 20–30 % своих возможностей [2]. В массовом производстве ситуация иная — специализированные станки показывают высокую эффективность, но при необходимости модификации требуют полной замены оборудования.

Экономические последствия нерационального использования производственных мощностей весьма существенны: повышение себестоимости продукции, избыточные затраты на содержание оборудования, неэффективное использование производственных площадей, снижение конкурентоспособности предприятий.

В современных условиях машиностроительное производство характеризуется неоправданно огромным разнообразием технологических процессов и оборудования. Предприятия сталкиваются с необходимостью ежегодного обновления физически неизношенных технологических средств, что приводит к значительным финансовым затратам [3]. При этом наблюдается низкий уровень востребованности технологических и технических возможностей имеющегося оборудования. Особенно это касается единичного и мелкосерийного производства, где универсальные станки используются далеко не на полную мощность.

В современных условиях особую значимость приобретает задача разработки методов эффективного использования имеющегося оборудования. Ключевым направлением развития становится поиск оптимальных решений по максимальному использованию технологических возможностей оборудования при выполнении различных производственных задач.

Учитывая ограниченность финансовых ресурсов, особенно у небольших машино- и приборостроительных предприятий, актуальной становится задача разработки принципов и методов, позволяющих технологу принимать обоснованные решения при выборе производственного оборудования.

Для повышения эффективности использования производственных мощностей необходимо внедрение следующих мер: принцип концентрации операций на одном станке, оптимизация загрузки оборудования, развитие методов рационального использования технических возможностей, внедрение современных систем управления производством. Особую актуальность приобретает разработка методов эффективного использования существующего оборудования, особенно для предприятий с ограниченными ресурсами. Это позволит: повысить производственную гибкость, снизить производственные издержки, улучшить качество продукции, усилить рыночные позиции.

На основе проведенного анализа можно сформулировать следующие практические рекомендации: комплексная оценка возможностей имеющегося оборудования, разработка гибких технологических процессов, внедрение модульных систем оснастки, создание информационных баз данных по возможностям оборудования.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что расширенное использование технологических возможностей производственного оборудова-

ния становится ключевым фактором конкурентоспособности современных предприятий. Это требует не только технического переоснащения, но и изменения подходов к организации производства, подготовки кадров и управления производственными процессами.

Эффективное использование производственных мощностей позволяет предприятиям сократить производственные издержки, повысить качество продукции, улучшить показатели гибкости производства.

В современных условиях только комплексный подход к решению проблемы эффективного использования производственных мощностей может обеспечить конкурентоспособность предприятий на рынке.

Список источников

[1] Четвериков И.А., Ельникова И.С. Вопросы расширения функциональных и технологических возможностей металлообрабатывающего оборудования. *Технические науки в России и за рубежом. V Междунар. науч. конф.: матер.* Москва, Буки-Веди, 2016, с. 35–40.

[2] Должиков В.П. *Технологии наукоемких машиностроительных производств.* Москва, Ларь, 2016, 314 с.

[3] Альгина М.В., Боднар В.А. Инновационный потенциал социально-экономической системы промышленного предприятия и его оценивание. *Аудит и финансовый анализ*, 2011, № 1, с. 342–351.

Optimization of the use of production capacities in modern industry

Bysov Sergey Alexandrovich bysov.s@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The current problems of efficient use of production capacities in modern industrial production conditions are considered. The structural changes taking place in modern industry are analyzed. A detailed analysis of the existing problems in the use of production equipment is presented. The economic consequences of the irrational use of production facilities are shown. It is concluded that a comprehensive solution to the problem of efficient use of production facilities requires a change in approaches to the organization of production. The results obtained can be applied to optimize production processes in various industries.

Keywords: *production facilities, technological equipment, production efficiency, load optimization, production modernization*

УДК 621.9

Анализ, классификация и способы подачи смазочно-охлаждающих технологических сред для повышения эффективности механической обработки

Коршунова Анна Вячеславовна korshunovaav@student.bmstu.ru
Зенкин Николай Васильевич zenkin-nv@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен комплексный анализ современных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), используемых в механической обработке материалов. Представлена детальная классификация СОТС по агрегатному состоянию и химическому составу, включающая газообразные, жидкие (на водной и масляной основе), пластичные и твердые среды. Подробно рассмотрены традиционные и современные методы подачи СОТС в зону обработки, их преимущества и ограничения. На основе анализа технологических характеристик различных типов СОТС сформулированы рекомендации по их рациональному выбору и применению для повышения эффективности механической обработки.

Ключевые слова: *СОТС, смазочно-охлаждающие жидкости, классификация, методы подачи, повышение эффективности*

Современное машиностроение характеризуется постоянным ростом требований к производительности, точности и экономической эффективности процессов механической обработки. В этих условиях особую значимость приобретает оптимизация всех элементов технологической системы, среди которых смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) играют важную роль. Практика ведущих машиностроительных предприятий демонстрирует, что грамотное применение СОТС позволяет повысить стойкость режущего инструмента в 1,2–4,0 раза, увеличить производительность обработки на 10–50 % и значительно снизить энергозатраты [1].

Особенно важное значение эффективные СОТС приобретают при обработке труднообрабатываемых материалов — жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов, которые широко используются в аэрокосмической отрасли, энергетическом машиностроении и других передовых отраслях промышленности. Кроме того, современные СОТС способствуют улучшению качества обработанной поверхности, снижению шероховатости и повышению эксплуатационных характеристик деталей.

В настоящее время в промышленности используется свыше 20 видов СОТС общего и специального назначения, что требует их систематизации и разработки четких рекомендаций по применению. Целью данной работы является комплексный анализ современных СОТС, их классификации и способов подачи для повышения эффективности процессов механической обработки [1].

Рассмотрим классификацию и свойства СОТС. Газообразные среды находят применение в случаях, когда использование традиционных жидкостей невозможно по технологическим, экологическим или экономическим причинам. Благодаря малому размеру молекул они обладают значительно большей проникающей способностью по сравнению с жидкостями, что особенно важно при обработке на высоких скоростях и при резании труднообрабатываемых материалов [2].

К активным газам относятся кислород, углекислый газ, водород, сероводород, хлор и другие химически активные вещества. Эти газы вступают в реакцию с материалом инструмента и обрабатываемой заготовки, образуя на поверхностях контакта хемосорбированные пленки, которые значительно снижают коэффициент трения и интенсивность износа инструмента [2].

К защитным газам относятся гелий, аргон и другие инертные газы, которые не образуют химических соединений с материалом детали и инструмента. Обработка в среде таких газов аналогична обработке в вакууме. Эти газы защищают вновь образующиеся при резании поверхности от контакта с активными газами, в первую очередь с кислородом воздуха. Они особенно эффективны для материалов, имеющих большое химическое сродство с кислородом и азотом.

Эмульсии представляют собой гетерогенные системы, состоящие из минеральных масел, эмульгаторов, ингибиторов коррозии, биоцидов и других функциональных присадок. Концентрация рабочих эмульсий обычно составляет 2–15 %. Основные преимущества: хорошая охлаждающая способность и относительно низкая стоимость.

Полусинтетические СОЖ занимают промежуточное положение между эмульсиями и синтетическими жидкостями. Их основу составляют вода, эмульгаторы и синтетические добавки (ПАВ, различные присадки, стабилизаторы). Обязательным компонентом является маловязкое нефтяное масло. Концентрация рабочих растворов — 1–10 %. Чувствительны к качеству воды. Синтетические СОЖ представляют собой гомогенные системы из водорастворимых полимеров, поверхностно-активных веществ, ингибиторов коррозии и других функциональных добавок. По универсальности и продолжительности сохранения эксплуатационных свойств они, как правило, превосходят эмульсии. Масляные СОЖ содержат 60–95 % минерального масла и комплекс функциональных присадок: противоизносных, противозадирных, антиокислительных, моющих и других. Обеспечивают высочайшее качество обработанной поверхности, но имеют относительно низкую охлаждающую способность и повышенную пожароопасность [3].

Пластичные смазки содержат минеральные, растительные или синтетические масла и загустители различной природы: неорганические (глина, слюда, асбест), углеводородные (парафин, воск, полимеры), мыльные (натриевые, литиевые, кальциевые).

Твердые СОТС применяются при высоких температурах и нагрузках. По химическому составу разделяются на: неорганические продукты слоистой

структуры (графит, MoS_2, тальк), органические соединения (воски, мыла, твердые жиры), мягкие металлы (олово, свинец, медь).

Процесс резания сопровождается сложным комплексом физико-химических явлений, происходящих в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Смазочно-охлаждающие технологические среды оказывают многокомпонентное воздействие на эти процессы, существенно влияя на температурно-силовые характеристики резания, износ инструмента и качество обработанной поверхности.

Смазывающая функция является ключевой для большинства СОТС. Ее основная задача — снижение адгезионного взаимодействия между контактными поверхностями инструмента и заготовки. Эффективное смазывание приводит к следующим положительным эффектам: снижение сил резания на 15–30 %, уменьшение мощности, потребляемой на процесс резания, снижение интенсивности износа инструмента, улучшение качества обработанной поверхности.

Эффективность смазывания зависит от химического состава СОТС, выполняемой операции, режимов резания и физико-химических свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Наибольшей охлаждающей способностью обладают СОЖ на водной основе, особенно при подаче под давлением через внутренние каналы инструмента.

Методы подачи смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) в зону резания классифицируются по характеру подачи на непрерывные и дискретные. Непрерывная подача обеспечивает интенсивное охлаждение, эффективное удаление стружки и высокую проникающую способность среды.

Помимо этого, существуют комбинированные методы, которые интегрируют различные способы подачи, реализуемые как параллельно, так и последовательно. Что касается лезвийной обработки, то на большинстве подобных операций применяются именно смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

Подача поливом является наиболее распространенным способом, осуществляемым при давлении 0,02–0,03 МПа. Расход СОЖ составляет 2–30 л/мин в зависимости от вида операции. Эффективность зависит от правильного выбора формы и траектории струи.

Использование сжиженных газов (азот, углекислота) позволяет осуществлять интенсивное охлаждение при температурах до –196 °С. Особенно эффективно при обработке труднообрабатываемых материалов.

Выбор оптимальной СОТС должен осуществляться на основе комплексного анализа следующих факторов:

– обрабатываемый материал (различные материалы требуют разных подходов к смазыванию и охлаждению);

– режимы резания (с увеличением скоростей и подач возрастают требования к охлаждающей способности);

– материал и геометрия инструмента (современные инструментальные материалы предъявляют специфические требования к СОТС) [4].

Проведенный анализ показывает, что современные смазочно-охлаждающие технологические среды представляют собой сложные многокомпонентные системы, эффективное использование которых требует глубокого понимания их физико-химических свойств и механизмов воздействия на процесс резания.

Для повышения стойкости инструмента необходимо обеспечить интенсивный отвод теплоты от нагретых участков зоны резания и инструмента. Смазывающее действие оказывает дополнительное положительное влияние на условия контактирования поверхностей инструмента и обрабатываемого материала.

Таким образом, повышение эффективности механической обработки достигается не простым применением СОТС, а за счет комплексного и обоснованного подхода, включающего целенаправленный выбор класса и состава СОТС на основе анализа обрабатываемого материала, вида операции и режимов резания; оптимизацию способа и параметров подачи среды для обеспечения ее максимального проникновения в зону контакта инструмента и заготовки.

Список источников

[1] Бердичевский Е.Г. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов. Справочник*. Москва, Машиностроение, 1984, 224 с.

[2] Виноградов Д.В. *Основные виды смазочно-охлаждающих технологических средств, применяемых при резании металлов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 96 с.

[3] Шолом А.В. Охлаждающие и триботехнические характеристики масляных смазочно-охлаждающих жидкостей. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2023, № 2, с. 148–153.

[4] Виноградов Д.В. *Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013, 90 с.

Analysis, classification and methods of supply of lubricating and cooling process media to improve the efficiency of mechanical processing

Korshunova Anna Vyacheslavovna korshunovaav@student.bmstu.ru
Zenkin Nikolay Vasilyevich zenkin-nv@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article provides a comprehensive analysis of modern lubricating and cooling process media (STS) used in the mechanical processing of materials. A detailed classification of STS by aggregate state and chemical composition is presented, including gaseous, liquid (water-based and oil-based), plastic and solid media. The traditional and modern methods of feeding STS into the processing area, their advantages and limitations are considered in detail. Based on the analysis of the technological characteristics of various types of STS, recommendations have been formulated for their rational choice and application to improve the efficiency of mechanical processing.

Keywords: *STS, lubricants and coolants, classification, feeding methods, efficiency improvement*

УДК 532.64

Математические представления и экспериментальные исследования смачиваемости шероховатых поверхностей

Юн Александр Владимирович yunav@student.bmstu.ru
Мусохранов Марсель Владимирович marsel@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены математические модели и экспериментальные исследования, описывающие влияние шероховатости на смачиваемость. Особенности микрорельефа поверхности существенно изменяют взаимодействие между металлом и смазочными материалами. Эти изменения могут быть не очевидными и имеют значение при разработке новых технологий и материалов. Статья будет полезна для специалистов, занимающихся разработкой и оптимизацией смазочных систем, а также исследователям в области материаловедения и поверхностных явлений, заинтересованных в улучшении эксплуатационных характеристик материалов.

Ключевые слова: *смачиваемость, шероховатость поверхности, угол контакта, методы измерения смачиваемости*

В последние десятилетия в инженерии и материаловедении увеличился интерес к поверхности материалов и их свойствам, связанные с развитием технологий в различных областях, таких как разработка и использование наноматериалов, биоинженерия, микроэлектронная, автомобильная, космическая промышленности. Одним из факторов, который оказывает влияние на эксплуатационные характеристики, является шероховатость поверхности. Параметры, связанные с микрорельефом поверхности, играют важную роль в многочисленных процессах, например трение, адгезия, коррозия, износ.

Целью данной исследовательской работы является изучение различных методов определения смачиваемости.

Актуальность данной научно-исследовательской работы заключается в возрастающем требованиям к качеству и долговечности деталей, где смачиваемость поверхностей играет ключевую роль в процессах смазывания, трения и износа.

Смачиваемость — это способность жидкости вытеснять газ для поддержания контакта с твердой поверхностью, возникающая в результате межмолекулярных взаимодействий, когда они сближаются. Мерой смачивания жидкостью твердых тел является угол контакта.

Угол контакта или угол смачивания (θ) — это угол, который образуется между касательной, проведенной к поверхности фазы жидкость-газ и твердой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта трех фаз, и условно измеряемый всегда внутрь жидкой фазы [1]. При угле меньше 90°, поверхность считается смачиваемой, при угле больше 90° — не смачиваемой. Смачиваемость зависит от множества факторов, таких как: химический со-

став поверхности, шероховатость поверхности, температуры и давления, присутствия поверхностно-активных веществ, структуры и морфологии поверхности, влажности и т. д.

Существуют различные способы уменьшения изнашивания пары контактирующих поверхностей: использование смазочных материалов, уменьшения шероховатости поверхности. Однако одновременное применение этих способов приводит к уменьшению их эффективности, так как на гладких поверхностях смазочные материалы могут не удерживаться должным образом, что увеличивает трение и износ, особенно при высоких нагрузках.

Способность к удержанию смазочных материалов на поверхностях является важным в машиностроении. Смазка заполняется между неровностями и впадинами, присутствующими на поверхности материала. Это помогает уменьшить износ, поскольку углубления на поверхности действуют как небольшой источник, обеспечивая постоянную подачу смазки и отвод тепла, выделяющегося при взаимодействии [2–4].

Модель Вензеля подразумевает, что жидкость вытесняет воздух из микронеровностей поверхности и полностью заполняет все углубления на поверхности. Угол контакта определяется как функция угла смачивания на гладкой поверхности и фактора шероховатости. Согласно уравнению Вензеля, изменение контактного угла выражается как

$$\cos\theta^* = r \cdot \cos\theta, \tag{1}$$

где r — отношение фактической площади контакта капли с поверхностью к площади ее проекции; θ и θ^* — углы смачивания гладкой и шероховатой поверхности соответственно.

Преимущества метода: точность расчета угла контакта для хорошо смачиваемых поверхностей; универсальность, может применяться к различным материалам и жидкостям.

Ограничения модели: не учитывает наличие воздушных карманов между каплей жидкости и шероховатой поверхностью, что может привести к неточным результатам для несмачиваемых систем; углы контакта зависят от точного определения фактора шероховатости, что может быть затруднительно при сложных геометриях поверхности; для материалов с высокой пористостью модель не дает адекватных результатов [5].

Модель Касси — Бакстера подразумевает, что между жидкостью и поверхностью остается воздушная прослойка. Угол контакта выражается как

$$\cos\theta^* = f_1\cos\theta_1 + f_2 \cdot \cos\theta_2, \tag{2}$$

где θ_1 — угол смачивания аналогичной плоской поверхности жидкостью; θ_2 — угол смачивания жидкостью газообразной фазы; f_1 и f_2 — доли площади взаимодействия твердое тело — жидкость и газ — жидкость соответственно, сумма долей равна единице [6].

Угол смачивания газообразной фазы с жидкостью составляет 180°, учитывая это получаем окончательное уравнение:

$$\cos\theta^* = f_1(1 + \cos\theta_1) - 1. \quad (3)$$

Преимущества метода: учет уловленного неровностями поверхности воздуха; применима для различных типов поверхностей и жидкостей, включая пористые и сложные структуры.

Недостатки метода: сложность расчетов; зависимость от геометрии, результаты могут сильно варьироваться из-за геометрии поверхности и распределения воздушных карманов, что требует более тщательной подготовки образцов; ограниченность применения к высокосмачиваемым системам [5].

Объединив уравнения Касси — Бакстера и Вензеля, можно получит переходный режим смачивания, учитывающий, как шероховатость поверхности, так и долю взаимодействия жидкость — твердое тело [7]:

$$\cos\theta^* = f_1 \cdot r \cdot \cos\theta_1 + f_2 \cdot \cos\theta_2. \quad (4)$$

Изменение топографии неровностей поверхности приводит к значительным изменениям значения краевого угла смачивания. Попадание воздуха не позволяет жидкости проникать в поры, и такое состояние является энергетически более выгодным. Однако под действием сил тяжести и давления Лапласа (капиллярное давление) капля частично может проникать вглубь текстуры поверхности.

До сих пор нет однозначного ответа на вопрос, каким образом достигается стабильное состояние смачивания. И, несмотря на успехи в оценке переходного состояния, условия перехода не определены [8].

Метод лежащей капли основывается на фиксировании капли жидкости, помещенной на твердую поверхность, и визуальном или автоматическом измерении угла между касательной к поверхности капли и линией, проходящей по поверхности твердого материала.

Преимущества: простота; универсальность; доступность.

Недостатки: измерения могут быть подвержены влиянию колебаний, вибраций и температуры, что может снижать точность; используется для статических измерений [9].

Метод оттока капли позволяет исследовать динамические изменения угла контакта во времени, что является важным аспектом в изучении смачиваемости. Этот метод позволяет наблюдать, как угол контакта изменяется, когда капля жидкости медленно перемещается или удаляется с поверхности.

Преимущества: позволяет изучать динамические характеристики смачивания; предоставляет данные о скорости изменения угла контакта во времени.

Недостатки: требует более сложного оборудования и настройки эксперимента по сравнению со статическим методом [10].

Метод молекулярной динамики — это численный метод, который использует компьютерные симуляции для исследования поведения атомов и молекул в различных системах. Этот метод применяется для предсказания угла контакта и изучения взаимодействий между жидкостями и твердыми поверхностями на атомарном уровне.

Преимущества: метод позволяет достигать высокой точности в расчетах взаимодействий на атомарном уровне; можно моделировать сложные системы, которые трудно или невозможно исследовать экспериментально.

Недостатки: требует значительных навыков в программировании и понимания физики молекулярных взаимодействий; проведение симуляций может занимать много времени, особенно для больших систем [11].

Список источников

[1] Шварц А., Перри Дж. *Поверхностно активные вещества.* Москва, Иностранной литературы, 1953, 550 с.

[2] Зимов А.Д. *Адгезия жидкости и смачивание.* Москва, Химия, 1974, 416 с.

[3] Сумм Б.Д., Горюнов Ю.Б. *Физико-химические основы смачивания и растекания.* Москва, Химия, 1976, 240 с.

[4] Carroll G.T., Turro N.J., Mammana Angela., Koberstein J.T. Photochemical Immobilization of Polymers on a Surface: Controlling Film Thickness and Wettability. *Photochemistry and Photobiology*, 2017, no. 93(5), pp. 1165–1169.

[5] Quere D. Wettong and roughness. *Annu. Rev. Mater. Res.,* 2008, no. 38, pp. 71–99.

[6] Cassie A.B.D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, no. 40, art. no. 546. https://doi.org/10.1039/tf9444000536

[7] Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. *Поверхностные силы.* Москва, Наука, 1985, 398 с.

[8] Миронюк А.В., Придотко А.В., Свидерский В.А. Анализ походов к математическому описанию характеристик материалов с повышенной гидрофобностью. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2015, № 5(77), с. 38–49.

[9] Drelich J. Guidelines to measurements of reproducible contact angles using a sessile-drop technique. *Surf Innov*, 2013. https://doi.org/10.1680/si.13.00010

[10] Albert E., Tegze B., Hajnal Z., Zámbó D., Szekrényes D.P. Robust contact angle determination for needle-in-drop type measurements. *ACS omega*, 2019, pp. 18465–18471. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02990

[11] Dhir V.K. Molecular dynamics simulation of the contact angle of liquids on solid surfaces. *Journal of Chemical Physics*, 2009, no. 130(3), art. no. 034705.

Mathematical modeling and experimental study of wettability of rough surfaces

Yun Alexander Vladimirovich yunav@student.bmstu.ru

Musohranov Marcel Vladimirovich marsel@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article discusses mathematical models and experimental studies describing the effect of roughness on wettability. Features of the surface microrelief significantly change the interaction between metal and lubricants. These changes may not be obvious and are important in the development of new technologies and materials. The article will be useful for specialists involved in the development and optimization of lubrication systems, as well as researchers in the field of materials science and surface phenomena interested in improving the performance characteristics of materials.

Keywords: *wettability, surface roughness, contact angle, wettability measurement methods*

УДК 621.771

Выбор оптимального способа литья детали типа «корпус»

Губанов Ярослав Алексеевич gubanovyaa@student.bmstu.ru
Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен сравнительный анализ методов изготовления заготовки. Проведено углубленное исследование разнообразных технологических подходов, применяемых в современном производственном процессе. Приведено понятие литья и общие сведения о данном методе производства. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из способов литья, и значимость оптимального способа изготовления заготовки. Статья будет полезна для специалистов, занимающихся разработкой и проектированием заготовок различными методами с целью выявления конечной стоимости, качества и эксплуатационные характеристики готового изделия.

Ключевые слова: *заготовка, способы, литье, литье по выплавляемым моделям, кокиль*

Для проведения сопоставительного анализа требуется конструкторский эскиз изделия, чтобы выполнить всестороннее изучение для выбора наиболее эффективного способа изготовления детали, такой как корпус подшипника. Кроме того, необходимо установить, к какому типу относится производство данной детали.

Детали, имеющие форму «Корпус», широко востребованы в машиностроительной отрасли и, как правило, выпускаются крупными партиями. При расчетах и анализе проектирования заготовок этого типа, примем объем партии в 5000 единиц, что соответствует крупносерийному производству [1].

Также следует провести изучение материала, из которого изготовлена деталь, и рассмотреть существующие аналоги, чтобы расширить перечень возможных методов ее изготовления. Материалом детали является Сталь 20 (ГОСТ 1050-88). Эта углеродистая конструкционная сталь высокого качества имеет широкое применение в различных отраслях промышленности. Она пользуется большой популярностью. Сталь 20 используется преимущественно для производства деталей, сварных сооружений, в строительстве и машиностроении, но перечисление всех сфер ее использования заняло бы много места. Благодаря своей практичности, эта марка стали занимает одно из ведущих положений на рынке черного металлопроката. Формирование деталей посредством литья подразумевает заполнение подготовленной формы расплавленным веществом (металлом, полимером, керамикой и пр.) с последующим его отвердеванием до обретения необходимой конфигурации. Данный метод является одним из наиболее популярных и рентабельных способов создания сложных компонентов, особенно при крупносерийном производстве. Характер производственного процесса в литейной отрасли обусловлен глав-

ным образом объемом выпускаемой продукции и уровнем повторяемости операций. Принятие решения о типе производства оказывает непосредственное влияние на выбор литейной технологии, применяемого оборудования, необходимой оснастки и организацию рабочего процесса.

Для изготовления заготовки типа «Корпус» можно рассмотреть следующие способы литья такие как литье в песчано-глинистые формы, литье в кокиль и литье по выплавляемым моделям [2].

Литье в песчано-глинистые формы. Жидкий металл подается в полость, созданную в песчаной форме, сформированной из песка, скрепляющих компонентов и добавок. Сильные стороны: экономичность, применимость для создания крупных и замысловатых компонентов, разнообразие используемых металлов (чугун, сталь, алюминиевые сплавы и т. д.), возможность серийного выпуска продукции, быстрое изготовление прототипов. Слабые стороны: не самая высокая точность габаритов и качество поверхности, потребность в последующей обработке резанием, потенциальное возникновение дефектов литья (образование пор и раковин). Область использования: оптимально для производства достаточно больших корпусов подшипников среднего размера, не требующих повышенных допусков [3].

Литье по выплавляемым моделям. Модель из воска, повторяющая контуры будущего изделия, покрывается керамическим составом, воск удаляется путем выплавления, а в образовавшееся пространство заливается расплавленный металл. Сильные стороны: превосходная точность размеров и гладкость поверхности, возможность получения сложных конфигураций с мелкими деталями, широкий спектр применяемых сплавов. Слабые стороны: значительная стоимость производства заготовок данным способом, ограничения по величине отливок, более продолжительный технологический процесс по сравнению с другими способами производства заготовок. Область использования: подходит для изготовления корпусов подшипников сложной формы, требующих высокой точности, особенно при производстве небольших партий или прототипов [4].

Литье в кокиль. Расплавленный металл подается в многократно используемую металлическую форму (кокиль). Сильные стороны: повышенная точность и качество поверхности по сравнению с литьем в песчаные формы, более высокая производительность, возможность получения более плотной структуры металла. Слабые стороны: более высокая стоимость формы по сравнению с песчаными формами, ограничения по геометрии отливок (затруднено получение внутренних полостей), меньший выбор используемых металлов. Область использования: подходит для серийного производства корпусов подшипников из цветных сплавов и чугуна, когда необходима большая точность, чем при литье в песчаные формы [5].

Исходя из рассмотрения трех способов литья по таким параметрам, как преимущества и недостатки, и проведения экономических расчетов, можно сделать вывод о том, что для детали типа «корпус подшипника» при выбранной серийности производства наиболее оптимальным методом является про-

изводство изделия в песчано-глинистые формы, так как оно обеспечивает наиболее оптимальное соотношение затрат к производству данной детали и при этом позволяет обеспечить быстрое производство деталей заданной серийности и требуемую точность для дальнейшей обработки заготовки [6].

Список источников

[1] *Машиностроение. Энциклопедия.* Москва, Машиностроение, 2004, 833 с.

[2] Синицкий О.В., Левандовский С.А., Моллер А.Б. *Моделирование процессов ОМД с применением искусственных нейронных сетей.* Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 2009, 21 с.

[3] *Марочник сталей и сплавов.* Москва, Машиностроение, 2003, 782 с.

[4] Кокорин В.Н., Мертенс К.К., Титов Ю.А., Григорьев А.А. *Технологические расчеты в процессах холодной листовой штамповки.* Ульяновск, Ульян. гос. техн. ун-т, 2002, 36 с.

[5] Килов А.С. *Обработка материалов давлением в промышленности.* Оренбург, ГОУ ОГУ, 2003, 266 с.

[6] Кобелев А.Г., Тюрин В.А., Шаронов М.А., Антощенков Ю.М. *Теория и технология процессов ковки и прессования: Составление чертежа поковки и разработка технологии ковки.* Москва, Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2002, 64 с.

Choosing the optimal casting method for a body-type part

Gubanov Yaroslav Alekseevich gubanovyaa@student.bmstu.ru
Malyshev Evgeny Nikolaevich malen@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article discusses a comparative analysis of the methods of manufacturing the workpiece. The article provides an in-depth study of various technological approaches used in the modern production process. The advantages and disadvantages of each of the casting methods and the importance of the optimal method of manufacturing the workpiece are considered. The article will be useful for specialists involved in the development and design of blanks by various methods in order to identify the final cost, quality and performance characteristics of the finished product.

Keywords: *billet, methods, casting, die casting, coquille*

УДК 004.94

Прогнозирование потери стойкости обрабатывающего инструмента с использованием возможностей AnyLogic

Борисов Сергей Андреевич borisov123467@yandex.ru
SPIN-код 3493-8290

Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru
SPIN-код 3167-1190

Описано прогнозирование потери стойкости режущего инструмента по теоретическому и эмпирическому вариантам на примере черновой стадии растачивания. Рассмотрена отливка, содержащая обрабатываемое сквозное отверстие с криволинейным профилем. Приведены особенности представления геометрического элемента в имитационной модели. Произведен лапидарный вывод формулы для определения потери стойкости на дискретном шаге. Показаны и проанализированы графики суммарного расходования стойкости и накопленной пройденной глубины резания. Выявлены границы возможных частных значений потерь стойкости и процентных выигрышей между базовым и новым сценариями. Сделан вывод о применимости результатов изыскания.

Ключевые слова: *обрабатывающий инструмент, стойкость инструмента, имитационное моделирование, AnyLogic*

В общем смысле продолжительность резания инструментом до его отказа, т. е. достижения предельно допустимого значения некоторого критерия, называется стойкостью инструмента [1]. Последнее занимает особое место из-за весомого вклада в надежность проектируемого машиностроительного производства, т. к. отказы, обусловливаемые выделяющейся сравнительной уязвимостью инструментов перед износом, переходя в потери, наследуются прочими элементами системы.

Полиаргументность интересующей функции стойкости соизмерима с обширностью каталога существующих подходов к ее анализу, и одним из основных факторов является глубина резания, изменчивость которой особенно заметна на первичных этапах обработки заготовок недостаточной точности.

Потеря стойкости рассматривается на примере черновой стадии растачивания цилиндрического отверстия корпусной отливки, произведенной из Стали 40Л заливкой металла в песчано-глинистые формы: исходный диаметр 71,4±1,75 мм растачивается до 76,6IT13 мм на всей длине отверстия, равной 100 мм.

Наличествующий способ литья отличается неудовлетворительными геометрическими характеристиками элементов заготовок, индуцирующими колебания размеров отверстия в поперечных сечениях. С учетом предельных отклонений возможная глубина резания принадлежит диапазону 1,725–3,475 мм.

Реализация имитационной модели требует подключения алгоритма преобразования объекта: а) габаритная длина отверстия 100 мм делится на 20

шагов Δl_i (дискретность); б) в сечении кривые располагаются симметрично относительно оси отверстия, все окружности между ними концентрические (тривиализация тела); в) кривая, изгибающаяся на уровне номинальной глубины резания 2,6 мм, заменяется набором из двадцати столбцов (аппроксимация). Интегрально: действительное отверстие воспринимается как двадцать концентрически расположенных колец с одинаковыми наружными диаметрами 76,6 мм и нетождественными между собой внутренними диаметрами от 69,65 до 73,15 мм.

Локальный профиль стороны каждого реального отверстия есть уникальная кривая, существующая в указанных ранее пределах. Для создания такого геометрического элемента используется кривая AnyLogic, реалистично генерируемая с использованием закона равномерного распределения. Пример случайной формы отверстия в продольном сечении приводится на рис. 1.

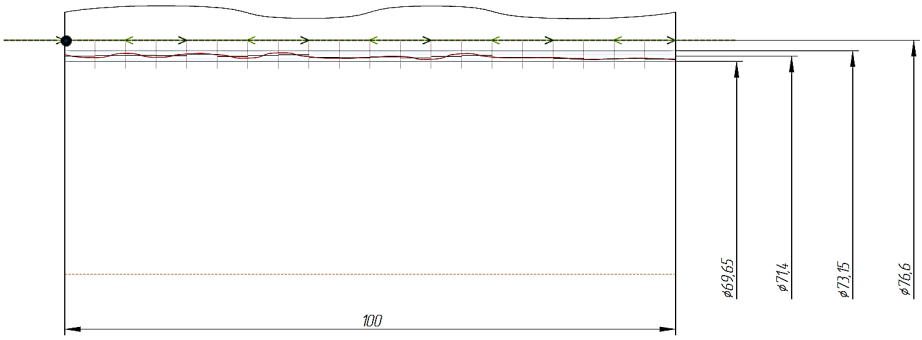


Рис. 1. Рандомизированная поверхность отверстия: красная кривая — поверхность отверстия; зеленые отрезки — пути подвода, резания, перебега и возвращения мнимой вершины инструмента, показанной в виде черной точки

Расчет и выбор режимов резания выполняется по справочнику технолога-машиностроителя [2]. Основные данные: осевая подача s_o 0,32 мм/об, скорость резания v 106,85 м/мин, частота вращения n 476,37 мин$^{-1}$. Их совокупность обеспечивает теоретическую стойкость инструмента 45 мин. Для автоматического получения вышеупомянутых значений применяется библиотека системной динамики AnyLogic — параметры, связи и динамические переменные [3]. Граф режимов резания представлен на рис. 2. Перемещение инструмента задается диаграммой состояний с переходами, содержащими выражения типа moveToInTime() [4]. Процессы поступления заготовок, выполнения ходов и регистрации данных изображены на рис. 3.

На этапе резания каждый шаг Δl_i вызывает потерю стойкости инструмента. Частное значение последней исходит из корневого уравнения

$$T = t_{\text{рез}}, \tag{1}$$

где T — принятая стойкость инструмента, мин; $t_{\text{рез}}$ — время резания, мин.

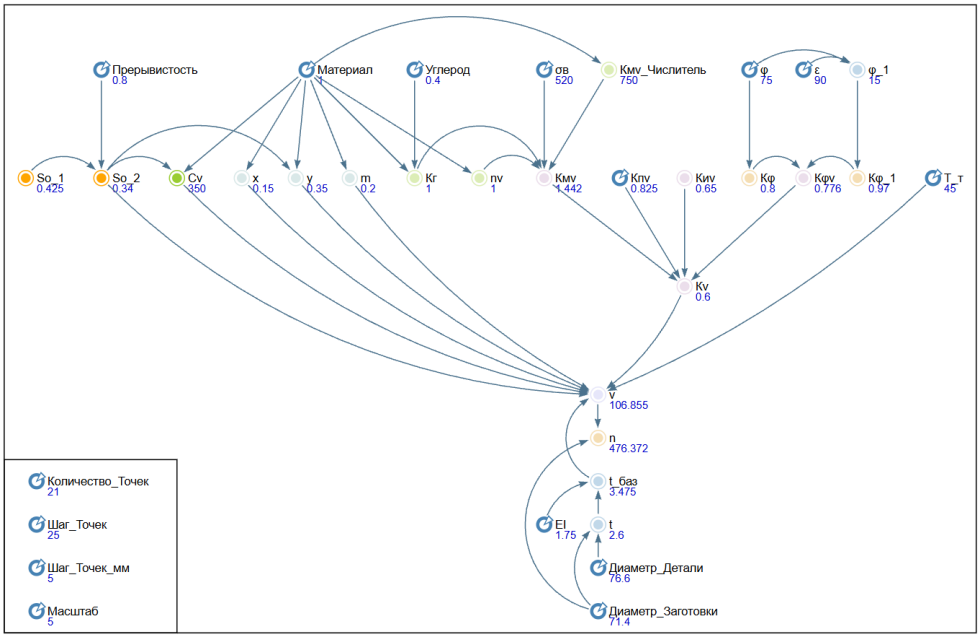


Рис. 2. Имплементированный блок системной динамики

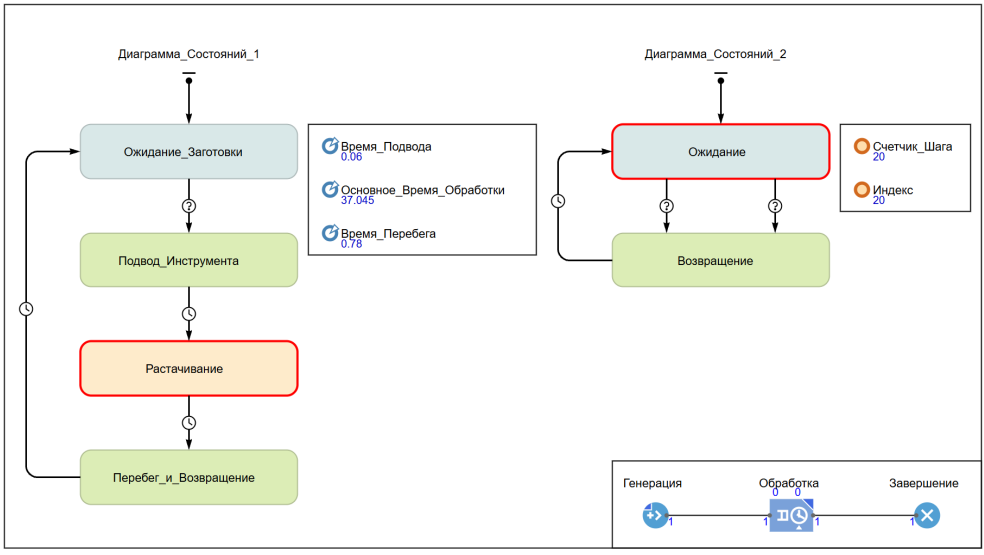


Рис. 3. Диаграммы процесса и состояний

Проясняющая модификация (1) выявляет максимальную длину резания, при прохождении которой запас стойкости T расходуется полностью:

$$L = \frac{1000 \cdot (C_v \cdot K_v)^{\frac{1}{m}} \cdot v^{1-\frac{1}{m}} \cdot s_0^{1-\frac{y}{m}}}{\pi \cdot d_з \cdot t^{\frac{x}{m}}}, \quad (2)$$

где C_v — коэффициент учета вида обработки, осевой подачи и материала режущей части; K_v — комплексный коэффициент; v — скорость резания, м/мин; s_0 — осевая подача, мм/об; $d_з$ — номинальный диаметр поверхности заготовки, мм; t — глубина резания, мм; x, y, m — показатели степени.

Все Δl_i суть части предельной длины L, следовательно фрагментарная потеря стойкости ΔT_i относится к базовой стойкости T так же, как шаг профиля Δl_i относится к пороговой длине L. Данное обстоятельство дает возможность выразить ΔT_i с удобной подстановкой непостоянного аргумента t_i:

$$\Delta T_i = \frac{\pi \cdot T \cdot \Delta l_i \cdot d_з \cdot t_i^{\frac{x}{m}}}{1000 \cdot (C_v \cdot K_v)^{\frac{1}{m}} \cdot v^{1-\frac{1}{m}} \cdot s_0^{1-\frac{y}{m}}}. \quad (3)$$

Глобально потеря стойкости инструмента протекает по двум сценариям — теоретическому (базовому) и эмпирическому (новому). В первом варианте инженер-технолог предполагает худшее стечение обстоятельств с максимальной глубиной резания, включающей нижнее предельное отклонение диаметра отверстия отливки, т. е. в выражении (3) каждый шаг вычислений выполняется с неизменной и одновременно максимальной $t_i = t_{max}$. Во втором случае учитывается актуальная кривизна обрабатываемой поверхности (рис. 1), вызывающая флуктуации t_i.

В рамках данной работы прогнозируются потери стойкости инструмента, приходящиеся на одну заготовку (20 шагов). Пример зависимостей суммарной потери стойкости инструмента $\sum_{i=1}^{20} \Delta T_i$ и кумулятивного накопления глубины резания $\sum_{i=1}^{20} \Delta t_i$ от длины резания по базовому и новому вариантам зафиксирован на рис. 4 (кривая зеркально отражена дважды и масштабирована для сравнительного анализа).

Заметно постоянство теоретических $\sum_{i=1}^{20} \Delta T_i$ и $\sum_{i=1}^{20} \Delta t_i$ на каждом шаге заготовки — график представляет из себя прямую (отрезок) с константным общим углом наклона. Также обнаруживается нелинейный характер графиков эмпирических изменений $\sum_{i=1}^{20} \Delta T_i$ и $\sum_{i=1}^{20} \Delta t_i$, в общих чертах коррелирующий с нижеприведенным профилем заготовки. Суммарная потеря стойкости и фонд преодоленных глубин резания по новому варианту меньше соответствующих по базовому.

В качестве вывода устанавливается: процентный выигрыш в потере стойкости равняется 21,4 % (эмпирические 0,287 мин против теоретических 0,365 мин), в пройденной глубине резания — 27,3 % (эмпирические 50,469 мм в сравнении с теоретическими 69,500 мм). Полученные данные также позволяют оценить выигрыш в будущих производимых деталях. К примеру, при данном

пороговом значении 0,365 мин, якобы означающем полное истощение запаса стойкости, эмпирический вариант предоставляет возможность обработать в 1,27 раза больше заготовок. При наращивании пути резания прослеживается тенденция «расхождения» двух графиков, что будирует дальнейшее увеличение выигрыша в количественных единицах.

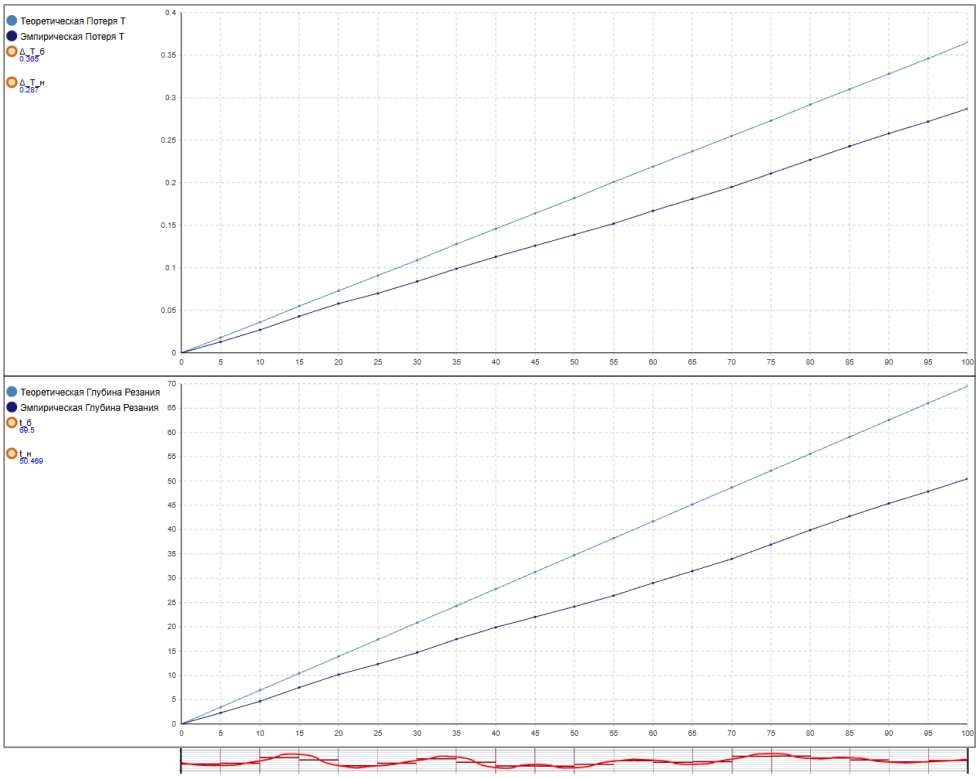


Рис. 4. Графики накопленной потери T и совокупно пройденной t

Эксперимент сравнения «прогонов» AnyLogic позволяет получить представление о возможных размахах потерь стойкости. На рис. 5 к рассмотрению предлагаются 25 опытов (выделены контекстуально важные) по определению процентного выигрыша в потере стойкости, проводимых над выборками, содержащими 100 заготовок.

Случайные воспроизведения демонстрируют возможный сегмент [13,42, 25,86] %. Прочие результаты: а) максимальная потеря стойкости — [0,27, 0,32] мин; б) суммарная глубина резания — [46,74, 57,39] мм; в) процентный выигрыш в глубине резания [17,42, 32,76] %. Все процентные выигрыши превышают экономически весомый ориентир 12 %.

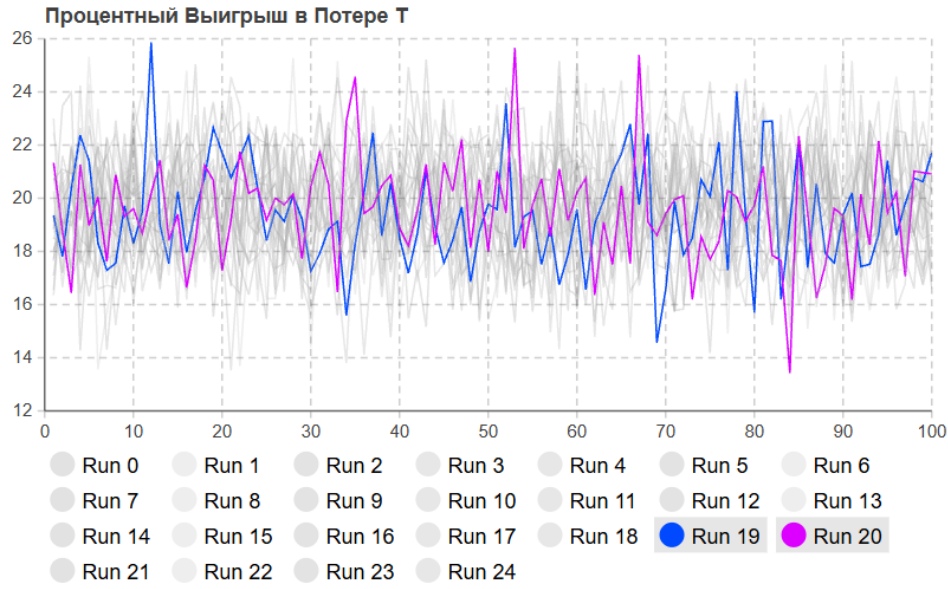


Рис. 5. Содержащие предельные отклонения выразительные опыты 20 и 21

Приобретенные сведения могут использоваться для составления прогнозов потери стойкости инструмента, корректирования значений режимов резания посредством смещения линий (рис. 4), перехода в ответвляющийся практичный способ визуального определения расходования стойкости по площади профиля, занимаемой реальными глубинами резания.

Список источников

[1] Кожевников Д.В. *Резание материалов*. Москва, Машиностроение, 2022, 170 с.

[2] Аверченков В.И., Аверченков А.В., Базров Б.М. *Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2*. Москва, Машиностроение, 2023, с. 366–380.

[3] Молотникова А.А. *Системный анализ. Краткий курс*. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 175 с.

[4] Лимановская О.В., Алферьева Т.И. *Моделирование производственных процессов в AnyLogic 8.1. Лабораторный практикум*. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2019, 44 с.

The Forecasting of process tool durability involving AnyLogic features

Borisov Sergey Andreevich borisov123467@yandex.ru
SPIN-code: 3493-8290

Malyshev Evgeniy Nikolaevich malen@bmstu.ru
SPIN-code: 3167-1190

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The forecasting of cutting tool durability based on theoretical and empirical alternatives is described in the context of rough boring. The casting with machined curvilineal through-hole profile is characterized. The specific details of geometric element demonstration in simulation model are given. The concise derivation of formula for calculating durability loss at a discrete step is carried out. The plots of summarized durability depletion and accumulated passed cutting depth are depicted and analyzed. The endpoints of possible particular values of durability losses and percentage advantages between basic and novel scenarios are revealed. The conclusion on the application of inquiry observations is drawn.

Keywords: *process tool, tool durability, simulation modeling, AnyLogic*

УДК 621.771

Исследование влияния технологических факторов на шероховатость поверхности при торцевом фрезеровании

Петрова Юлия Сергеевна petrovayus@student.bmstu.ru
Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема обеспечения качества обработанных поверхностей деталей. Основное внимание уделено одному из ключевых показателей качества — шероховатости поверхности, формируемой в процессе фрезерования. Подробно исследовано влияние режимов резания (подачи, скорости, глубины) и жесткости системы СПИД на высоту микронеровностей. Описана методика для экспериментального исследования шероховатости на универсально-фрезерном станке модели 6В75П с использованием профилометра ИШП-6100. Статья будет полезна для специалистов, занимающихся фрезерной обработкой и контролем качества деталей в машиностроении.

Ключевые слова: *шероховатость поверхности, торцевое фрезерование, режимы резания, высота микронеровностей, профилометр*

Качество обработанной поверхности детали напрямую определяет важнейшие эксплуатационные свойства машиностроительных изделий, такие как износостойкость, жесткость, усталостная прочность и коррозионная стойкость. Шероховатость, определяемая стандартом как совокупность неровностей с относительно малыми шагами, является непосредственным результатом применяемого метода обработки [1]. Одним из самых распространенных таких методов является фрезерование, что делает изучение закономерностей формирования шероховатости при фрезеровании крайне важной практической задачей.

На величину шероховатости при фрезеровании влияет широкий спектр факторов. К ним относятся режимы резания (глубина, подача, скорость), химический состав и структура обрабатываемого материала, геометрия и материал режущего инструмента, условия смазки и охлаждения, а также общее состояние и жесткость технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД) [2].

Все эти причины можно объединить в три фундаментальные группы [3]. Первая группа связана с геометрическими параметрами резания, когда режущие кромки инструмента напрямую копируют свой профиль на обрабатываемую поверхность, оставляя после себя гребешки металла. Высоту этих неровностей ($H_р$) можно достаточно точно рассчитать математически, и она является предсказуемой составляющей шероховатости. Вторая группа причин обусловлена сложными физическими процессами в зоне резания, а именно пластическими и упругими деформациями материала, трением, образованием нароста на режущей кромке. Эти явления вносят отклонение (ΔH)

в фактическую высоту неровностей от расчетной. Третья группа связана с динамическими явлениями — относительными вибрациями инструмента и заготовки, которые также увеличивают ΔH. Факторы второй и третьей групп носят зачастую случайный характер, и их точный прогноз крайне затруднен.

Таким образом, общую высоту неровностей Rz можно представить в виде модели $Rz \approx H_р + \Delta H$, где $H_р$ — расчетная геометрическая составляющая, а ΔH — приращение, вызванное деформациями и вибрациями [4]. Эта модель наглядно показывает, что для снижения шероховатости необходимо воздействовать на обе составляющие.

Влияние режимов резания на шероховатость носит сложный и нелинейный характер. Подача на зуб (S_z) — параметр, который оказывает наибольшее влияние. С ее увеличением теоретическая высота неровностей резко возрастает, что закономерно ухудшает качество поверхности. Однако при очень малых подачах (менее 0,02 мм/зуб) наблюдается парадоксальный эффект: шероховатость не только не уменьшается, но может даже расти [5]. Это объясняется тем, что на первый план выходят негативные явления второй группы — инструмент не срезает стружку, а начинает давить, протаскивать и пластически деформировать материал, вызывая значительное увеличение ΔH. Скорость резания оказывает преимущественное влияние на вторую составляющую шероховатости. Ее влияние проявляется опосредованно через изменение температуры в зоне резания, процессов трения и наростообразования. Например, при фрезеровании сталей на средних скоростях может наблюдаться рост шероховатости из-за интенсивного образования нароста, который на высоких скоростях исчезает, что ведет к улучшению качества поверхности. Глубина резания, в отличие от подачи и скорости, не оказывает прямого существенного влияния на шероховатость, хотя в некоторых случаях, например, при снятии поверхностного упрочненного слоя, ее увеличение может косвенно улучшить качество поверхности за счет перехода на обработку однородного материала.

Крайне важным, но часто недооцениваемым фактором является жесткость всей технологической системы СПИД. Недостаточная или неравномерная жесткость приводит к упругим отжатиям инструмента и заготовки, а также к возникновению вибраций в процессе обработки. Это вызывает нестабильность процесса и колебания значений шероховатости на разных участках одной обработанной поверхности [6].

Для экспериментального исследования шероховатости в условиях единичного и мелкосерийного производства может применяться универсально-фрезерный станок модели 6В75П. Данный станок обладает гибкостью, позволяя вести обработку как горизонтальным, так и вертикальным шпинделем, и использовать различные типы столов для установки заготовки [7]. Измерение параметров шероховатости осуществляется с помощью современного прибора — профилометра ИШП-6100. Принцип его действия основан на механическом ощупывании поверхности алмазной иглой и преобразовании ее

перемещений в электрический сигнал, который затем обрабатывается микропроцессором. Прибор позволяет измерять основные параметры шероховатости *Ra* и *Rz*, а также передавать данные на компьютер для последующего анализа, что делает его удобным инструментом для контроля качества.

Список источников

[1] ГОСТ 25142–82. *Шероховатость поверхности. Термины и определения.* Москва, Стандартинформ, 1982, 15 с.

[2] Горбацевич А.Ф., Шкред В.А. *Курсовое проектирование по технологии машиностроения.* Минск, Вышэйшая школа, 2019, 256 с.

[3] Схиртладзе А.Г., Гук В.А. *Технология машиностроения.* Москва, Юрайт, 2020, 543 с.

[4] Косов М.Г. *Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов.* Москва, Академия, 2018, 320 с.

[5] *Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2.* Москва, Машиностроение, 2018, 944 с.

[6] *Лабораторный практикум по технологии машиностроения и металлорежущим станкам.* Москва, Машиностроение, 2017, 328 с.

[7] Чернов Н.Н. *Металлорежущие станки.* Москва, Машиностроение, 2019, 495 с.

Research of the influence of technological factors on surface roughness during face milling

Petrova Yulia Sergeevna petrovayus@student.bmstu.ru
Malyshev Evgeny Nikolaevich malen@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article discusses the problem of ensuring the quality of machined surfaces of parts. The main attention is paid to one of the key quality indicators — surface roughness, formed in the process of milling. The article examines in detail the effect of cutting modes (feed, speed, and depth) and the rigidity of the SPID system on the height of micro-irregularities. It describes a methodology for experimentally studying surface roughness on a 6V75P universal milling machine using an ISHP-6100 profilometer. This article will be useful for specialists involved in milling and quality control of parts in mechanical engineering.

Keywords: *surface roughness, face milling, cutting modes, micro-irregularities, profilometer*

УДК 621.9-1/-9

Установочные элементы приспособлений: требования, типы и влияние на точность обработки

Кузьмина Елизавета Михайловна kuz_mina@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено значение установочных элементов в обеспечении точности изготовления деталей при обработке заготовок. Описаны ключевые требования к элементам: определение числа и расположения опор, минимизация размеров рабочих поверхностей, жесткость конструкции, возможность быстрой замены и высокая износостойкость. Приведены типы опор (с плоской, сферической и насеченной головкой), регламентированные ГОСТами, и обоснованы сферы их применения в зависимости от состояния базовых поверхностей заготовки (чистовых или черновых).

Ключевые слова: *установочные элементы, базирование заготовки, погрешность базирования, типы опор*

В современном машиностроении и металлообработке точность изготовления деталей выступает ключевым критерием качества продукции и надежности конечного изделия. Достижение требуемой точности во многом определяется не только возможностями металлорежущего оборудования, но и правильностью базирования заготовки на этапе ее установки в приспособление. Ключевую роль при этом играют установочные элементы — базовые компоненты приспособления, которые при правильном размещении формируют опорные точки для базирования заготовки [1].

К установочным элементам предъявляют ряд строгих требований.

Четкое определение числа и расположения элементов. Это необходимо для надежного базирования заготовки, обеспечения ее устойчивости и жесткости закрепления. Правильное позиционирование исключает нежелательное смещение детали в процессе обработки.

Минимальные размеры рабочих поверхностей. Такой подход снижает влияние погрешностей изготовления технологической базы и ее макронеровностей на общую погрешность базирования. Чем меньше площадь контакта, тем меньше вероятность искажения положения заготовки из-за дефектов базовой поверхности.

Вы*сокая жесткость элементов и их соединений.* Это требование направлено на минимизацию деформаций самих установочных элементов и контактных деформаций в зоне сопряжения с корпусом приспособления. Жесткая конструкция предотвращает искажения, вызванные силовыми нагрузками в процессе обработки.

Возможность быстрой замены. Конструкция должна предусматривать оперативный демонтаж и установку новых элементов при их износе или повреждении. Это повышает ремонтопригодность приспособления и сокращает время простоя оборудования.

Износостойкость рабочих поверхностей. Чтобы минимизировать влияние износа на точность установки, материалы и покрытие установочных элементов должны обладать высокой стойкостью к истиранию. Это особенно важно при массовом производстве, где элементы подвергаются многократным циклам нагружения.

Выбор конкретных установочных элементов зависит от габаритов заготовки, ее массы и качества и состояния базовых поверхностей.

Каждая опора способна ограничивать 1–3 степени свободы заготовки. Базирование по плоскости реализуется через размещение элементов в трех опорных точках, лежащих в одной плоскости, но не на одной прямой [2]. Такой подход лишает заготовку перемещения вдоль оси z, поворотов вокруг осей x и y.

Среди установочных элементов выделяют постоянные и регулируемые опоры, которые различаются по форме рабочей поверхности.

Опоры с плоской головкой (ГОСТ 13440-68) применяются для заготовок с обработанными (чистовыми) базовыми плоскостями. Их ровная поверхность обеспечивает максимальный контакт с качественной поверхностью заготовки, гарантируя точное позиционирование [3].

Опоры со сферической головкой (ГОСТ 13441-68) используются для необработанных (черновых) плоскостей. Сферическая форма обеспечивает точечный контакт, что снижает вероятность перекоса при взаимодействии с неровной поверхностью [4].

Опоры с насеченной (рифленой) головкой (ГОСТ 13442-68) предназначены для высоконагруженных операций. Насечки увеличивают коэффициент трения между опорой и заготовкой, предотвращая проскальзывание и повышая устойчивость детали при интенсивных режимах обработки [5].

Особенности применения:

– сферические опоры минимизируют влияние неровностей черновой поверхности, так как контакт происходит в одной точке, что исключает локальные перекосы;

– рифленые опоры за счет увеличенного трения обеспечивают надежное закрепление при больших силовых нагрузках, например при фрезеровании или тяжелом точении.

В рамках последующего анализа влияния опор на погрешность установки в исследовании планируется использовать опоры со сферической головкой. Их выбор обусловлен способностью компенсировать дефекты черновых поверхностей и обеспечивать стабильное базирование даже при наличии макронеровностей на базовой плоскости заготовки.

Таким образом, точность изготовления деталей напрямую зависит от корректного выбора способа установки заготовки в технологическое приспособление, где ключевую роль играют установочные элементы. Их грамотное проектирование и применение позволяют обеспечить выше перечисленные требования.

Список источников

[1] Корсаков В.С. *Основы конструирования приспособлений*. Москва, Машиностроение, 1983, 227 с.

[2] Горохов В.А., Схиртладзе А.Г., Коротков И.А. *Проектирование технологической оснастки*. Старый Оскол, ТНТ, 2010.

[3] ГОСТ 13440–68. *Опоры постоянные с плоской головкой для станочных приспособлений. Конструкция и размеры*. Москва, Стандартинформ, 1968.

[4] ГОСТ 13441–68. *Опоры постоянные со сферической головкой для станочных приспособлений. Конструкция и размеры*. Москва, Стандартинформ, 1968.

[5] ГОСТ 13442–68. *Опоры постоянные с насеченной головкой для станочных приспособлений. Конструкция и размеры*. Москва, Стандартинформ, 1968.

Installation elements of devices: requirements, types and impact on processing accuracy

Kuzmina Elizaveta Mikhailovna kuz_mina@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The importance of mounting elements in ensuring the accuracy of manufacturing parts during the processing of workpieces is considered. The key requirements for the elements are described: determining the number and location of supports, minimizing the size of work surfaces, structural rigidity, the possibility of quick replacement and high wear resistance. The types of supports (with a flat, spherical and notched head) regulated by GOST standards are given, and the scope of their application is justified depending on the condition of the base surfaces of the workpiece (finishing or roughing).

Keywords: *mounting elements, billet basing, basing error, types of supports*

УДК 621.9.02

Шероховатость поверхности и ее роль в формировании качества лакокрасочного покрытия

Суханцов Александр Максимович sana05122003@gmail.com
Мусохранов Марсель Владимирович Marsel@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено влияние параметров шероховатости поверхности на качество и адгезию лакокрасочных покрытий. Представлены основные механизмы взаимодействия покрытия с микрорельефом поверхности и показана их роль в формировании прочности сцепления. Приведен анализ оптимальных диапазонов шероховатости для различных типов покрытий. Сделан вывод, что управление микрогеометрией поверхности позволяет повысить долговечность, равномерность и коррозионную стойкость лакокрасочных систем, что может применяться при проектировании и технологической подготовке деталей машиностроения.

Ключевые слова: *шероховатость поверхности, адгезия, лакокрасочное покрытие, микрорельеф, подготовка поверхности, качество покрытия*

Шероховатость поверхности является одним из ключевых параметров, определяющих эксплуатационные свойства деталей машин, а также качество последующих технологических операций, включая нанесение лакокрасочных покрытий. В нормативной документации шероховатость трактуется как совокупность мелких неровностей, возникающих в процессе обработки материала или в результате его износа. Эти микронные отклонения существенно влияют на процессы трения, удержание смазочных составов и адгезионные характеристики покрытий.

На первый взгляд поверхность детали может казаться идеально гладкой, однако при увеличении становится заметно, что она имеет сложный микрорельеф — систему выступов и впадин различной формы и размеров. Такая микротопография во многом определяет, насколько эффективно лакокрасочный материал будет взаимодействовать с основой и формировать устойчивое сцепление.

Формирование шероховатости обусловлено совокупным влиянием технологических факторов. Различные способы механической обработки — точение, фрезерование, шлифование, полирование — оставляют на поверхности свой характерный след, являющийся результатом взаимодействия инструмента и материала [1].

Для количественной оценки микрорельефа применяются стандартизированные параметры, определяющие характеристики поверхности. Наиболее распространенным показателем является среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, отражающее среднюю высоту микронеровностей относительно условной средней линии. Дополнительно используют параметры *Rz* —

среднюю высоту неровностей в пределах базовой длины, и *Rmax* — максимальную высоту профиля [2]. Совместное использование этих величин позволяет более полно описывать микрогеометрию с учетом как амплитуды, так и распределения неровностей.

Шероховатость поверхности нельзя рассматривать отдельно от других характеристик микрогеометрии — она тесно связана с волнистостью и общей топографией детали [3]. В совокупности эти параметры формируют структуру поверхности, определяя ее способность равномерно удерживать лакокрасочный слой и обеспечивать прочное сцепление с основой. Волнистость представляет собой неровности большей длины волны, возникающие из-за вибраций, износа инструмента или технологических колебаний оборудования. Взаимодействие этих факторов задает характер микрорельефа, от которого напрямую зависит качество будущего покрытия.

Эффективность лакокрасочного слоя определяется не только состоянием поверхности, но и физико-химическими процессами, происходящими на границе раздела «металл–краска». Адгезия, обеспечивающая прочность, износостойкость и коррозионную стойкость покрытия, формируется под воздействием микрорельефа, который задает реальную площадь контакта и распределение сил взаимодействия между материалами [4].

Механизмы сцепления разнообразны. Механическое зацепление возникает при проникновении частиц краски в микровпадины и поры, где после полимеризации они надежно фиксируются. Избыточная шероховатость, напротив, способствует образованию воздушных полостей и неравномерности слоя. Диффузионное сцепление проявляется, когда компоненты покрытия частично проникают в поверхностный слой металла — этот эффект особенно характерен для порошковых и полимерных систем при термообработке. Электростатическое взаимодействие наблюдается при нанесении порошковых красок методом электростатического напыления: частицы притягиваются к заряженной противоположным образом поверхности, формируя равномерный и плотный слой до его термозакрепления.

Шероховатость непосредственно влияет на механическую и частично на молекулярную составляющую адгезии. Она определяет реальную площадь контакта, угол смачивания и равномерность распределения краски. Оптимальный микрорельеф обеспечивает надежное смачивание и проникновение материала в неровности, тогда как чрезмерно гладкая или, наоборот, грубая поверхность приводит к дефектам — подтекам, микрополостям и пузырькам, ухудшающим защитные свойства покрытия.

Помимо микрорельефа, значительное влияние на адгезию оказывает общее состояние поверхности. Наличие загрязнений, оксидных пленок, остатков смазочных веществ или влаги приводит к образованию промежуточных слоев, ослабляющих сцепление. Для устранения подобных дефектов применяют механическую и абразивную обработку, пескоструйные и шлифовальные методы, а также химическую подготовку — обезжиривание, травление и фосфатирование. Эти процедуры формируют активный слой с заданными

микрогеометрическими параметрами, соответствующими требованиям стандартов по подготовке поверхности.

Физико-химические процессы, сопровождающие взаимодействие лакокрасочного состава с металлом, подтверждают ключевую роль шероховатости в обеспечении равномерного распределения покрытия и его долговечности. Данные закономерности служат теоретической основой для инженерных решений в области технологического проектирования защитных и декоративных систем.

Качество лакокрасочного покрытия определяется совокупностью эксплуатационных и визуальных характеристик детали [5]. Оно зависит не только от состава краски, но и от микрогеометрии поверхности, определяющей уровень адгезии и толщину нанесенного слоя. Оптимальная шероховатость создает микромеханические зацепления, обеспечивающие надежное удержание краски после полимеризации. При избыточной неровности появляются воздушные включения, микрополости и неравномерность толщины, что приводит к дефектам типа «апельсиновой корки», пузырям и локальному снижению коррозионной стойкости.

Чрезмерно гладкая поверхность также нежелательна. При низких значениях параметра *Ra* (менее 0,4 мкм) реальная площадь контакта между основой и покрытием минимальна, и сцепление ограничивается слабым молекулярным взаимодействием [6]. В результате возможно отслаивание, шелушение и потеря адгезии, особенно в условиях термических колебаний и вибраций.

Оптимальные значения шероховатости выбираются с учетом свойств лакокрасочного материала. Для порошковых покрытий предпочтительна более грубая поверхность, обеспечивающая механическую фиксацию частиц; для жидких — умеренный микрорельеф, способствующий равномерному распределению; для антикоррозионных систем — выраженная текстура, повышающая барьерные свойства.

Шероховатость выступает регулируемым параметром, определяющим не только механическую прочность адгезии, но и термодинамическое равновесие на границе раздела фаз. Контроль микрогеометрии поверхности становится ключевой задачей инженеров-технологов, так как именно структура основы задает прочность, надежность и долговечность защитного покрытия.

Список источников

[1] Герасименко А.А. *Технология машиностроения.* Москва, Академия, 2015, 544 с.

[2] ГОСТ Р ИСО 4287–2014. *Геометрия поверхности. Термины, определения и параметры шероховатости.* Москва, Стандартинформ, 2015, 24 с.

[3] Калякин В.И. *Материаловедение.* Москва, Академия, 2016, 480 с.

[4] Морозов Е.М. *Покрытия и защита металлических поверхностей.* Санкт-Петербург, Лань, 2018, 384 с.

[5] Костенко В.Ф. *Технология отделочных процессов в машиностроении.* Москва, Машиностроение, 2009, 312 с.

[6] Морозов Е.М. *Покрытия и защита металлических поверхностей.* Санкт-Петербург, Лань, 2018, 384 с.

Surface roughness and its role in shaping the quality of paint and varnish coatings

Sukhancov Aleksandr Maksimovich sana05122003@gmail.com
Musokhranov Marsel Vladimirovich Marsel@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The influence of surface roughness parameters on the quality and adhesion of paint coatings is considered. The main mechanisms of interaction between the coating and surface microrelief are presented, and their role in forming adhesion strength is shown. Optimal roughness ranges for different coating types are analyzed. It is concluded that controlling surface microgeometry improves the durability, uniformity, and corrosion resistance of paint systems, which can be applied in the design and technological preparation of mechanical engineering components.

Keywords: *surface roughness, adhesion, paint coating, microrelief, surface preparation, coating quality*

УДК 621.9.025

О планировании стойкости металлорежущих инструментов в условиях неопределенности

Малышев Евгений Николаевич malen@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлена методика определения планового периода стойкости металлорежущего инструмента. Показано, что фактическая стойкость инструмента может изменяться под влиянием множества факторов, поэтому для выбора планового значения стойкости необходимо использовать статистические данные. Показано, как распределение Вейбулла может использоваться для статистической обработки накапливаемых данных. Для рассматриваемого примера использованы общепринятые ключевые критерии принятия решений в условиях неопределенности, на основе которых принимается решение о плановом периоде стойкости инструмента.

Ключевые слова: *металлорежущий инструмент, период стойкости инструмента, принятие решений, статистические данные*

Стойкость инструмента является ключевым параметром, влияющим на качество, точность обработки, производительность и себестоимость производства. Согласно ГОСТ 25751-83, срок службы режущего инструмента — это время его работы от начала резания до отказа. Этот параметр зависит от множества факторов, включающих характеристики материалов, режимы обработки, условия эксплуатации и состояние оборудования. Исследования в этой области позволяют учитывать и управлять этими факторами для повышения стойкости инструментов.

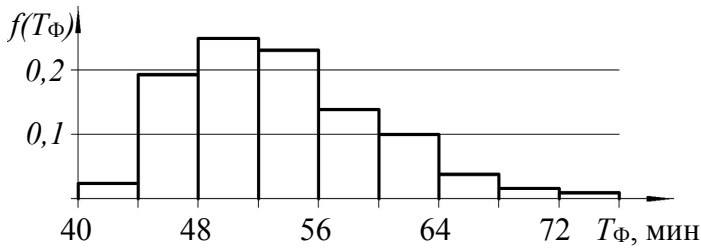
Современные теоретические подходы к прогнозированию и обеспечению требуемой стойкости инструментов основаны на математических моделях, учитывающих множество факторов [1]. Результаты моделирования демонстрируют хорошую сходимость с практическими данными и находят применение в производстве. Однако эти факторы сами зависят от множества других переменных, что делает срок службы инструмента вероятностной величиной. Вариативность этого параметра может проявляться даже в пределах одной партии инструментов, приобретенных у одного производителя.

Важным аспектом является определение планового значения срока службы [2]. Если фактический срок службы превышает плановый, это означает наличие неиспользованного резерва стойкости, что приводит к упущенной выгоде. Если фактический срок службы ниже планового, это свидетельствует о дефиците стойкости, что может привести к снижению прибыли.

Важно понимать, что если пользователь занижает планируемую стойкость инструмента, то тем самым он занижает количество заготовок, которые могли бы быть обработаны этим инструментом, что приводит в целом к финансовым потерям предприятия [3].

Здесь становится важным при принятии решения учитывать формируемый в ходе наблюдений набор статистических данных.

На рисунке показана статистика накопленных данных при измерении стойкости 129 инструментов. Материал инструментов — Т5К10. Обработке подлежали детали типа «вал» протачиванием на глубину 0,5 мм. Материал детали — сталь 20Х.



Фактическая стойкость $T_Ф$ резцов

Проведенные исследования [4] показали, что если в представленных обстоятельствах была запланирована стойкость инструмента 72 минуты, то существовала вполне определенная вероятность того, что на самом деле его стойкость ограничивалась 64 минутами, тогда последние 11 % времени работы инструмента сопровождалось изготовлением брака.

Также, с другой стороны, было установлена определенная вероятность того, что если была заложена стойкость резцов 48 минут, а по факту он был бы способен работать до 72 минут, то не был полностью использован потенциал инструмента.

Согласно статистическим данным, представленным на рис. 1, вероятность того, что фактический период стойкости инструмента превысит 72 минуты, составляет не более 0,8 %. Положительный знак в этом контексте не является гарантией увеличения стойкости инструмента в реальных условиях эксплуатации, но указывает на теоретическую возможность такого явления.

Для организации работы системы предупредительной замены инструмента необходимо определить плановый срок службы с учетом вариативности фактического срока службы [5].

При известных вероятностях решений часто используются: критерии Лапласа, максимального оптимизма, Вальда, Сэвиджа и Гурвица.

Применение критерия Лапласа в процессе для оценки принятия решений о назначении принудительного периода стойкости инструмента в 54 минуты показывает, что существует неоспоримая вероятность недооценки стойкости, выражаемая потерями 3,3 % технологической себестоимости изготавливаемых деталей.

Аналогично использование критерия максимального оптимизма для оценки принятия решений о назначении принудительного периода стойкости

инструмента в 66 минут показывает, что также существует убедительная вероятность недооценки стойкости, выражаемая потерями 0,1 % технологической себестоимости изготавливаемых деталей.

Критерий Вальда, наоборот, показывает, если назначить период стойкости 66 минут, то убытки из-за более раннего выхода инструмента из строя составят 8,4 % от технологической себестоимости изготовления детали.

Критерий Сэвиджа полностью повторяет выводы, сделанные по критерию Вальда.

И наконец, критерий Гурвица, при назначении периода стойкости в 50 минут, приводит к результату потерь в 8,4 %, что совпадает с критериями Вальда и Сэвиджа, но коренным образом отличается по величине назначаемого периода стойкости.

Здесь видно, как классические критерии принятия решений в условиях неопределенности позволяют оценивать принимаемые решения по стойкости инструмента на основе статистических данных.

Какой критерий учитывать, и какую стойкость из приведенных следует назначить, выбирает лицо, ответственное за принимаемое решение, исходя из опыта и интуиции. Наиболее предпочтительным представляется назначить стойкость 66 минут, сопровождаемую наименьшими потерями технологической стойкости (0,1 %), определенную по критерию максимального оптимизма.

Список источников

[1] Козловский В.П., Косарев К.А., Кисель А.Г. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на стойкость фрезы при торцевом фрезеровании жаропрочной стали. *Металлообработка*, 2023, № 2(134), с. 3–7.

[2] Пегашкин В.Ф., Пегашкина Е.В., Пищевская Е.С. Математическая модель стойкости режущего инструмента в условиях нечетких множеств. *Вестник машиностроения*, 2017, № 2, с. 70–72.

[3] Пасько Н.И., Анцев А.В., Анцева Н.В., Сальников С.В. Комплексная модель износа режущего инструмента и пример ее применения для оптимизации режима профилактики. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2015, № 11-1, с. 192–202.

[4] Малышев Е.Н., Лошкарева Е.А., Зенкин В.Н. О статистической устойчивости параметров распределения Вейбулла в практическом описании стойкости металлорежущих инструментов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 12(777), с. 44–51.

[5] Силкина Г.Ю. *Теория принятия решений и управление рисками. Модели конфликтов, неопределенности, риска.* Санкт-Петербург, Изд-во СПбГПУ, 2003, 72 с.

On planning the durability of metal-cutting tools in conditions of uncertainty

Malyshev Evgeny Nikolaevich malen@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A method for determining the planned durability period of a metal-cutting tool is presented. It is shown that the actual durability of the tool can change under the influence of many factors, therefore, statistical data must be used to select the planned durability value. It is shown how the Weibull distribution can be used for statistical processing of accumulated data. For this example, the generally accepted key criteria for decision-making in conditions of uncertainty are used, on the basis of which a decision is made on the planned period of durability of the instrument.

Keywords: *metal cutting tool, tool durability period, decision-making, statistical data*

УДК 658.5:69

Об управлении проектом создания цеха тяжелого машиностроения в условиях неполных исходных данных по технологическому оборудованию

Лобуз Василий Владимирович[1] lobuz@bmstu.ru
Панюшин Иван Вениаминович[2] paniushin@mail.ru
Рижская Дарья Дмитриевна[1] dasha.rizhskaya@gmail.com

[1] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
[2] *НИУ МГСУ, Москва, Россия*

Статья посвящена особенности управления строительным проектом в условиях неполных исходных данных. На примере строящегося промышленного объекта тяжелого машиностроения проведен анализ влияния корректировок проектной документации на сроки и стоимость реализации проекта. Использованы методы сценарного и вероятностного анализа для оценки диапазона возможных отклонений и определения управленческих резервов. Предложена система организационно-управленческих мер, включающая внедрение реестра исходных данных, регламента управления изменениями и цифровой среды BIM(ТИМ). Показано, что реализация данных мер обеспечивает снижение числа корректировок и увеличение вероятности завершения проекта в срок.

Ключевые слова: *машиностроение, управление проектом, инвестиционный проект, исходные данные, сценарный анализ, управление изменениями, BIM (ТИМ)*

Современные инвестиционные машиностроительные проекты характеризуются высокой сложностью и множеством участников [1], что в случае отсутствия полного объема исходных данных создает риски корректировок проектной документации, увеличения сроков и стоимости реализации проекта [2].

Исходными данными для создания машиностроительного комплекса служат: перечень технологического оборудования (определенный на основании технологических процессов), энерго- и ресурсопотребление каждой единицы оборудования, трехмерная конфигурация и габариты, распределение весов по отношению к фундаменту, ограничения по расположению относительно строительных конструкций и кранового поля. Основной сложностью предоставления исходных данных со стороны заказчика в настоящее время является необходимость получения положительного результата торгов по каждой единице технологического оборудования, после оплаты которых выигравшая компания начинает только конструировать это оборудование. Таким образом, на равномерность и полноту выдачи исходных данных влияют как компетенции заказчика и участников рынка, так и процесс бюджетирования самого заказчика.

По результатам анализа проектной документации по реализуемому объекту тяжелого машиностроения в г. Магнитогорске установлено, что из 145

комплектов рабочей документации (РД) на момент анализа реализовано 72, из которых 31 (43,1 %) подверглись корректировкам.

Основными причинами корректировок являются неполнота исходных данных (73 % совокупных дополнительных сроков) и изменения требований заказчика (около 68 % дополнительных затрат).

Для количественной оценки влияния корректировок применен сценарный анализ, предусматривающий построение трех сценариев [3]: консервативного, базового и стрессового.

Результаты показали, что при доле корректировок от 25 до 55 % совокупное увеличение сроков реализации проекта составляет 1,4–3,1 месяца, а прирост стоимости — 60–132 млн рублей.

На основе анализа обоснованы управленческие резервы: по срокам — 10 % (2 месяца), по стоимости — 1 % бюджета (≈135 млн руб.), что покрывает диапазон вероятных отклонений базового сценария.

Для проверки устойчивости сценарных оценок использован метод Монте-Карло [4], проведенный в 10 000 итераций с использованием фактических данных матрицы корректировок.

Результаты вероятностного моделирования подтвердили совпадение медианных значений (P50) с базовым сценарием: прирост срока составляет около 2,5 месяцев, стоимости — около 100 млн рублей.

С вероятностью 80 % (P80) отклонения не превышают 3 месяцев и 140 млн рублей, что подтвердило достоверность сценарных допущений.

На основании результатов анализа разработан комплекс организационно-управленческих мер [5, 6], направленных на повышение устойчивости проекта:

– создание реестра исходных данных (РИД) с назначением ответственных и контролем статуса данных в BIM(ТИМ)-среде;

– введение регламента управления изменениями, включающего последовательность шагов: инициирование, оценка влияния, согласование, реализация;

– формирование роли куратора изменений от заказчика, координирующего взаимодействие между проектировщиком и подрядчиком;

– внедрение BIM(ТИМ)-среды как цифрового контура управления проектом [5], обеспечивающего визуализацию статусов, интеграцию РИД и реестра изменений, автоматическую отчетность управления по показателям.

В результате реализации предложенных мер ожидается снижение числа корректировок до 25 %, сокращение времени согласования в 2 раза и повышение вероятности завершения проекта в срок с 0,8 до 0,9.

Предложенные решения обеспечивают переход от реактивного устранения последствий к проактивному управлению изменениями и формируют основу цифрового управления жизненным циклом строительного проекта.

Заключение. Проведенное исследование показало, что качество и полнота исходных данных являются ключевым фактором успеха реализации инвестиционно- строительного проекта тяжелого машиностроения.

Применение сценарного подхода [3] и метода Монте-Карло [4] позволило количественно оценить влияние корректировок на показатели проекта и определить управленческие резервы.

Разработанная организационно-управленческая система и цифровые инструменты (РИД, управление изменениями, BIM(ТИМ)) [5, 6] обеспечивают устойчивость и предсказуемость реализации строительных проектов в условиях неопределенности.

Список источников

[1] ГОСТ Р 54869–2011. *Управление проектами. Требования к управлению проектом*. Москва, Стандартинформ, 2011.

[2] ГОСТ Р 51901.12–2007/ISO 31010:2009. *Менеджмент риска. Методы оценки риска.* Москва, Стандартинформ, 2006.

[3] *Руководство к своду знаний по управлению проектами.* Ньютаун-Сквер, Project Management Institute, 2021.

[4] ГОСТ Р ИСО 21500–2023. *Управление проектами, программами и портфелями проектов. Контекст и основные понятия.* Москва, Стандартинформ, 2023.

[5] СП 48.13330.2019. *Организация строительства*. Москва, Стандартинформ, 2019.

[6] Hao Q., Shen W., Neelamkavil J., Thomas R. Change management in construction projects. *Proceedings of the CIB W78 25th International Conference on Information Technology: Improving the Management of Construction Projects through IT Adoption*. Santiago, Chile, University of Talca, 2008, pp. 387–396.

About project management for the creation of a heavy machinery workshop in conditions of incomplete initial data on technological equipment

Lobuz Vasily Vladimirovich[1] lobuz@bmstu.ru
Panyushin Ivan Veniaminovich[2] paniushin@mail.ru
Rizhskaya Darya Dmitrievna[1] dasha.rizhskaya@gmail.com

[1] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

[2] *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", Moscow, Russia*

The article is devoted to the specifics of managing a construction project in conditions of incomplete initial data. Using the example of an industrial heavy engineering facility under construction, an analysis of the impact of adjustments to project documentation on the timing and cost of the project was carried out. The methods of scenario and probabilistic analysis were used to estimate the range of possible deviations and determine management reserves. A system of organizational and managerial measures is proposed, including the introduction of a registry of source data, change management regulations and the BIM digital environment. It is shown that the implementation of these measures ensures a reduction in the number of adjustments and an increase in the probability of completing the project on time.

Keywords: *mechanical engineering, project management, investment project, initial data, scenario analysis, change management, BIM*

УДК 621.91

Некоторые технологические рекомендации по выбору инструментального материала для токарной обработки

Ойдинская Софья Владимировна osv22t288@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рациональный выбор инструмента позволяет обеспечить заданную стойкость инструмента, интенсифицировать режимы резания, снизить трудоемкость обработки заготовки. При выборе инструмента руководствуются многими параметрами, один из главных — материал. Большинство крупных производителей режущих инструментов дают некоторые рекомендации по выбору материалов, однако они охватывают только ассортимент конкретного производителя и зачастую при подборе аналогов инструмента у технологов возникают трудности. Поэтому важно систематизировать эти рекомендации. В работе перечислены технологические рекомендации для технологов по выбору инструментальных материалов для точения.

Ключевые слова: *токарная обработка, режущий инструмент, твердый сплав, режущая керамика, кермет, кубический нитрид бора, поликристаллический алмаз*

На выбор материала режущего инструмента влияют свойства материала заготовки: твердость, вязкость, теплопроводность. При этом очень важен метод обработки: черновое, получистовое или чистовое точение. В работе были рассмотрены следующие виды инструментальных материалов: твердые сплавы с покрытием, твердые сплавы без покрытия, керметы, режущая керамика, кубический нитрид бора, поликристаллический алмаз. Часть из них представлена на рис. 1.

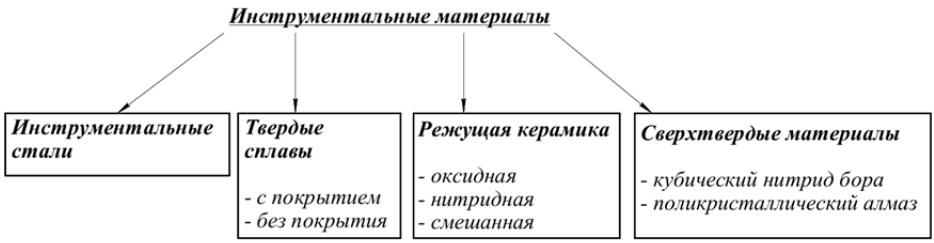


Рис. 1. Классификация инструментальных материалов

Твердосплавные пластины с покрытиями — наиболее частый выбор при точении сталей. Твердый сплав с градиентной основой и толстым многослойным CVD-покрытием, состоящим из карбонитрида титана, оксида алюминия и нитрида титана, обычно используется для обработки нелегированных, низ-

ко- и среднелегированных сталей [1–5]. Он обеспечивает хорошую красностойкость и прочность. Сплавы с CVD-покрытием малой толщины иногда применяются для получистового точения нержавеющих сталей. Крупнозернистые и среднезернистые твердые сплавы обладают повышенной прочностью и гораздо меньшей твердостью, а также хорошей вязкостью, что делает их частым выбором при черновом и получистовом точении [6]. В совокупности с утолщенным CVD-покрытием из карбонитрида титана, оксида алюминия и нитрида титана применяются для обработки нержавеющих сталей и иногда чугунов. При работе в нестабильных условиях используются пластины с PVD-покрытием из нитрида титана-алюминия, нитрида титана. Мелкие зерна карбида вольфрама обеспечивают повышенную твердость, из-за этого их, совместно с толстым CVD-покрытием, используют при чистовом точении чугунов в стабильных условиях [1]. При использовании пластин с PVD-покрытием зона применения смещается в сторону получистового точения жаропрочных сплавов. Что касается субмикронных зерен карбида вольфрама, они хорошо работают при циклических тепловых и механических нагрузках, поэтому часто используются при сверлении и фрезеровании. Если говорить про токарную обработку, то совместно с PVD-покрытием, обеспечивающим острую режущую кромку и предотвращающим налипание стружки, могут применяться для получистового точения нержавеющих сталей, жаропрочных сплавов. Возможна обработка серых, ковких и отбеленных чугунов [2]. Твердые сплавы без покрытия используются реже, так как они обладают невысокой стойкостью. Их применение целесообразно при невысоких нагрузках на режущую кромку, например при обработке цветных сплавов на основе титана, алюминия, а также закаленных сталей на невысоких скоростях.

Керметы, за счет своего состава, обладают очень высокой износостойкостью, хорошо работают с материалами, склонными к наростообразованию (кроме алюминия), однако их основной недостаток — низкая стойкость к термическим нагрузкам и низкая прочность. Эти свойства определяют область применения данного инструментального материала — получистовое точение нелегированных, низкоуглеродистых сталей, а также чистовое точение аустенитных и ферритных нержавеющих сталей. Часто используются при высокоскоростной обработке [7].

Режущую керамику можно разделить на оксидную, нитридную и смешанную. Нитридная керамика характеризуется самой высокой прочностью (за счет удлиненных кристаллов) и ударной вязкостью среди режущей керамики, но меньшей твердостью и химической стабильностью [8]. Область применения — обработка чугунов и иногда жаропрочных сплавов. Оксидная керамика обладает высокой твердостью при повышенных температурах и низкой теплопроводностью, однако химически инертна и очень хрупка, часто применяется для обработки закаленных сталей и тонкого чистового точения чугунов. Смешанная керамика обладает повышенной прочностью и теплостойкостью, поэтому данный инструментальный материал используется

при тонком чистовом точении материалов высокой твердости и чугунов. Может также применяться для получистового точения жаропрочных сплавов. Этот тип режущей керамики можно считать самым универсальным и распространенным.

Кубический нитрид бора — идеальный, а иногда и единственный вариант для обработки материалов высокой твердости, так как он обладает высокой теплостойкостью и исключительной твердостью при повышенных температурах [9], которые обычно характерны для обработки таких материалов. Часто используется при чистовом и получистовом точении закаленных сталей и чугунов [3].

Поликристаллический алмаз из-за высокой химической активности углерода по отношению к железу не применяется для точения стали, зато это очень хороший выбор для чистового точения цветных металлов [10]. Также для этой цели можно использовать пластины с алмазным покрытием, которое не только увеличивает твердость и износостойкость, но и уменьшает трение стружки об инструмент, что приводит к понижению температуры в зоне резания.

В работе были сделаны выводы по наиболее рациональному выбору режущего инструмента в зависимости от обрабатываемого материала и метода обработки.

Список источников

[1] *Руководство по металлообработке. Технический справочник*. Sandvik Coromant, 2010, 789 с.

[2] *Металлорежущий инструмент. Каталог-справочник режущего инструмента*. Кировград, Кировградский завод твердых сплавов, 2025, 342 с.

[3] *Токарный инструмент ISKAR. Метрический каталог-справочник режущего инструмента*. Iskar, 2022, 850 с.

[4] *Общий каталог. Инструменты для точения, сверления, резьбонарезания, фрезерования и оснастка*. Walter Engineering Kompetenz, 2017, 327 с.

[5] *Мастер каталог. Часть первая. Невращающиеся инструменты*. Kennametal, 2018, 273 с.

[6] Зубков Н.Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2013, № 05, с. 75–100.

[7] Дробышев А.А. Инструментальные керметы: свойства и преимущества. *Актуальные вопросы теории и практики развития научных исследований. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Уфа, OMEGA SCIENCE, 2020, 276 с.

[8] Гениатулин А.М. Анализ состояния и перспектив развития режущей керамики. *Вестник Курганского государственного университета*, 2011, № 1(20), с. 56–58.

[9] Боровский Г.В. Высокопроизводительная прецизионная обработка закаленных сталей малоразмерными инструментами из кубического нитрида бора. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2012, т. 2, № 2, с. 30–38.

[10] Спиридонова Т.Э., Алибеков С.Я. Современные инструментальные материалы. *Инженерные кадры — будущее инновационной экономики России. III Всерос. студ. конф.: матер*. Йошкар-Ола, Поволжский государственный технологический университет, 2017, ч. 1, с. 129–133.

Some technological recommendations for the selection of tool materials for turning

Oydinskaya Sofya Vladimirovna osv22t288@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

A rational tool selection enables ensuring the specified tool life, intensifying cutting conditions, and reducing the workpiece processing labor intensity. The choice of a tool is guided by many parameters, one of the main ones being the material. Most major cutting tool manufacturers provide certain recommendations for material selection; however, these only cover the specific manufacturer's product range, and technologists often face difficulties when selecting tool equivalents. Therefore, it is important to systematize these recommendations. This paper lists technological recommendations for technologists on the selection of tool materials for turning.

Keywords: *turning, cutting tool, cemented carbide, cutting ceramic, cermet, cubic boron nitride, polycrystalline diamond*

УДК 621.9.02

Влияние теплового точения на топографию поверхностей деталей машин

Федюков Евгений Александрович evgenii.fedukov@gmail.com
Мусохранов Марсель Владимирович Marsel@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено влияние теплового токарного точения на формирование топографии поверхности деталей. Проанализированы механизмы воздействия высокотемпературного источника на микрорельеф, шероховатость и волнистость. Показано, что комбинированное термомеханическое воздействие позволяет целенаправленно модифицировать структуру поверхностного слоя. Приведены сравнительные данные по параметрам Ra и Rz для традиционного и теплового точения. Сделан вывод о перспективности метода для управления эксплуатационными свойствами поверхностного слоя, такими как износостойкость и усталостная прочность, что актуально для ответственных деталей в машиностроении.

Ключевые слова: *тепловое точение, топография поверхности, шероховатость, микрорельеф, поверхностный слой, термомеханическая обработка, качество поверхности*

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к качеству и эксплуатационным характеристикам поверхностного слоя деталей, который во многом определяет их долговечность и надежность. Топография поверхности, включающая шероховатость, волнистость и макроотклонения, формируется на заключительных этапах механической обработки. Одной из перспективных технологий, позволяющих активно влиять на эти параметры, является тепловое токарное точение.

Тепловое точение представляет собой комбинированный метод обработки, сочетающий силовое резание с локальным нагревом зоны резания высококонцентрированным источником тепла (например, плазменной дугой или лазерным излучением). Нагрев обрабатываемого материала приводит к снижению его прочности и пластичности в зоне стружкообразования, что позволяет существенно снизить усилие резания и температуру в контакте инструмента с заготовкой по сравнению с традиционными методами [1]. Это коренным образом меняет механизм формирования микрорельефа.

Основное влияние теплового точения на топографию поверхности связано с изменением пластического деформирования поверхностного слоя и модификацией механизма стружкообразования. При традиционном точении образование микронеровностей является следствием пластической деформации, упругого восстановления материала и геометрического копирования режущей кромки инструмента. Введение теплового фактора уменьшает степень упругого восстановления и снижает склонность материала к наклепу, что

в совокупности ведет к снижению параметра шероховатости *Ra* на 20–40 % по сравнению с обработкой без подогрева [2].

Ключевым аспектом формирования топографии при тепловом точении является управление тепловым потоком. При оптимальных режимах (мощность нагрева, скорость подачи, глубина резания) происходит «сглаживание» микрорельефа за счет пластифицирующего действия тепла. Материал в зоне резания легче снимается стружкой, уменьшается вероятность вырывания частиц материала и образования задиров. Однако чрезмерная мощность нагрева может привести к негативным эффектам: окислению поверхности, структурным превращениям (отпуск, образование зоны термического влияния), что, в свою очередь, ухудшает однородность микрорельефа и может повысить параметр *Rz* (высота неровностей по десяти точкам) [3].

Помимо шероховатости, тепловое точение существенно влияет на волнистость поверхности. Вибрации, неизбежно возникающие в процессе резания, являются основной причиной волнистости. Снижение усилия резания при тепловой обработке минимизирует вибрации как системы «станок — приспособление –инструмент — деталь», что приводит к уменьшению амплитуды и высоты волн. В результате формируется более регулярная и предсказуемая топография, что критически важно для деталей, работающих в условиях контактного взаимодействия (подшипники, уплотнения) [4].

Глубокое понимание процессов, происходящих в поверхностном слое, невозможно без анализа его фазового и деформационного состояния. Исследования, проведенные методом рентгеноструктурного анализа, показывают, что при тепловом точении высокоуглеродистых сталей происходит уменьшение уровня остаточных напряжений сжимания по сравнению с холодным точением. Это связано с релаксацией напряжений в условиях повышенной температуры. Однако, как отмечается в работе [5], при определенных режимах возможно формирование благоприятного градиента остаточных напряжений, повышающего усталостную прочность детали.

Топография поверхности, полученная тепловым точением, характеризуется не только улучшенными количественными параметрами (*Ra*, *Rz*), но и качественным изменением структуры. Исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии показывают, что на такой поверхности отсутствуют характерные для холодного точения трещины и зоны интенсивного наклепа. Микрорельеф состоит из более плавных и округлых выступов и впадин, что благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах [6]. Такая поверхность лучше удерживает смазочные материалы, обладает повышенной контактной выносливостью и меньшей склонностью к концентрации напряжений.

Особый интерес представляет применение теплового точения для обработки труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные никелевые сплавы и титановые сплавы. Для этих материалов характерны высокие усилия резания и интенсивный износ инструмента, что приводит к быстрой деградации топографии обработанной поверхности. Как показано в работе [7],

использование плазменного подогрева при точении титанового сплава ВТ6 позволило не только снизить силу резания на 50 %, но и добиться снижения шероховатости *Ra* с 1,2 до 0,6 мкм за счет подавления явления упрочнения обрабатываемого материала и уменьшения образования нароста на режущей кромке.

Важным практическим выводом является возможность целенаправленного управления свойствами поверхностного слоя путем подбора режимов теплового точения. Для достижения минимальной шероховатости (*Ra* = 0,2–0,4 мкм) применяют режимы с умеренным нагревом и высокими скоростями резания. Для создания заданной микротекстуры, способствующей удержанию масла, можно использовать режимы, способствующие формированию регулярного микрорельефа с оптимальным шагом и глубиной неровностей. При этом, как подчеркивается в работе [8], критическое значение имеет синхронизация положения теплового пятна и режущей кромки инструмента, так как их рассогласование даже на несколько миллиметров сводит на нет все преимущества метода и может привести к термическому повреждению поверхности.

Таким образом, тепловое токарное точение является мощным инструментом для управления топографией поверхности деталей машин. Оно позволяет не только улучшить чистоту поверхности, но и сформировать микрорельеф с заданными функциональными свойствами, а также управлять структурой и остаточными напряжениями в поверхностном слое. Дальнейшее развитие метода связано с совершенствованием систем автоматического контроля и регулирования теплового воздействия для обеспечения стабильного высокого качества поверхности при обработке современных труднобрабатываемых материалов.

Список источников

[1] Горохов В.А. *Технология конструкционных материалов.* Москва, Машиностроение, 2017, 608 с.

[2] Зорин В.И. *Комбинированные методы обработки в машиностроении.* Москва, Академия, 2019, 256 с.

[3] Ковальчук П.С. *Технология и оборудование тепломеханической обработки.* Санкт-Петербург, Лань, 2020, 320 с.

[4] Петров А.Н. *Динамика и виброакустика станков.* Москва, Машиностроение, 2018, 288 с.

[5] Белов С.В. *Остаточные напряжения и прочность деталей.* Москва, Наука, 2016, 412 с.

[6] Клюев В.В. *Современные проблемы машиноведения.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 412 с.

[7] Аникин В.Ю. *Высокоэффективная обработка титановых сплавов.* Санкт-Петербург, Профессия, 2019, 368 с.

[8] Лесовик Р.Р. *Автоматизация гибридных технологических процессов.* Москва, Техносфера, 2022, 304 с.

The influence of thermal turning on the topography of machine part surfaces

Fedukov Eugene Alexandrovich evgenii.fedukov@gmail.com
Musokhranov Marsel Vladimirovich Marsel@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The influence of thermal turning on the formation of surface topography of parts is considered. The mechanisms of the high-temperature source impact on microrelief, roughness, and waviness are analyzed. It is shown that the combined thermomechanical impact allows for targeted modification of the surface layer structure. Comparative data on Ra and Rz parameters for conventional and thermal turning are provided. The conclusion is made about the prospects of the method for controlling the operational properties of the surface layer, such as wear resistance and fatigue strength, which is relevant for critical components in mechanical engineering.

Keywords: *thermal turning, surface topography, roughness, microrelief, surface layer, thermomechanical processing, surface quality*

УДК 621.7. 014

Исследование возможностей интенсификации теплообмена при применении смазочно-охлаждающей жидкости

Захарова Маргарита Эдуардовна vin.m@bmstu.ru
Инагамов Умид Шавкатович sabrinakamalitdinova@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено влияние способов подачи смазочно-охлаждающих жидкостей на тепловой режим работы режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов. Представлены результаты экспериментов при точении стали 12Х18Н10Т с применением газожидкостной смеси, показавшие снижение температуры в зоне контакта инструмента и заготовки. Показано, что использование СОЖ в виде механической смеси с воздухом способствует локальному разрушению ламинарного слоя и интенсификации теплообмена. Сделаны выводы, что применение газожидкостной смеси позволяет повысить стойкость режущего инструмента до двух раз и может быть рекомендовано для повышения эффективности охлаждения при высокоскоростной обработке.

Ключевые слова: *теплообмен, смазочно-охлаждающая жидкость, газожидкостная смесь, обработка резанием, температурная стойкость*

Интенсивное выделение тепла при резании труднообрабатываемых материалов приводит к развитию неблагоприятных теплофизических условий для работы инструмента. По данным Сю Кай и др, для изменения термического режима контактных поверхностей режущего инструмента надо воздействовать охлаждающей средой не на деталь или стружку, а прежде всего, на инструмент, причем, возможно ближе к его наиболее нагретым участкам. Снижение температуры на контактной площадке передней поверхности инструмента является результатом увеличения интенсивности теплового потока, направляемого из инструмента в СОЖ [1].

С целью усиления эффективности охлаждающих или смазывающих свойств применяют следующие способы подачи СОЖ в зону резания: а) свободно падающей струей; б) напорной струей; в) струей газов; г) в распыленном виде. Подача СОЖ свободно падающей струей является наиболее широко применяемым способом в металлообработке. Это объясняется высокими технологическими возможностями, простотой и надежностью в эксплуатации. Но при всей своей простоте данный способ не всегда удовлетворяет требованиям создания благоприятного термодинамического режима работы режущего инструмента и, как следствие, требованиям повышения его стойкости. Задача состоит в изыскании и исследовании возможностей интенсификации теплообмена между инструментом и СОЖ, сохраняя в то же время наиболее простой способ подачи жидкости свободно падающей струей.

Процесс теплопередачи в приконтактных зонах режущего инструмента можно представить следующей моделью. При омывании СОЖ инструмента в процессе резания на его приконтактных зонах из-за адсорбционных эффектов образуется тонкий гидродинамический слой, через который теплопередача может осуществляться только путем теплопроводности. Поэтому для улучшения теплообмена необходимо или повысить теплофизические свойства самой СОЖ, или свести толщину ламинарного слоя до минимума. Интенсифицировать теплообмен удается, используя СОЖ в виде механической смеси с воздухом или другими газами. Пузырьки газов, взаимодействуя с нагретыми околоконтактными поверхностями вызывают локальное разрушение ламинарного слоя, уменьшая в общем случае его толщину.

Для исследования влияния способов охлаждения на перераспределение тепловых полей режущего инструмента в мировой практике используются экспериментальные установки, позволяющие проводить сравнительный анализ между газожидкостным и традиционным охлаждением с применением СОЖ [1–3]. На кафедре «Технология машиностроения» ТГТУ анализ выполняли при точении 12Х18Н10Т резцом ВК8 при поливе 5 % эмульсии РЗ СОЖ8, подаваемой в зону резания свободно падающей струей при режимах: t = 1,0 мм/об., S = 0,14 мм/об., V = 50–100 м/мин. В качестве критерия оценки эффективности СОЖ было принято относительное снижение температуры при использовании газожидкостной смеси относительно обычной СОЖ, измеренной в определенных точках приконтактной зоны (на передней поверхности вдоль тела резца относительно его вершины). Полученные результаты представлены в таблице.

Расстояния от вершины резца	**Относительное снижение температуры (%) при V м/мин.**				
	50	**70**	**80**	**90**	**100**
1,0	10	6	5	3	3
1,9	17	15	15	16	13
2,9	18	15	15	13	14
3,9	25	13	24	17	14
4,7	23	22	14	22	13

Анализ полученных данных показывает, что применение газожидкостной смеси изменяет тепловое поле резца, снижая абсолютные значения температуры во всем исследуемом диапазоне скоростей резания по сравнению с обычной СОЖ. Однако с повышением скорости резания эффективность ее падает. Снижение температуры резания приводит к существенному повышению стойкости режущего инструмента. Так, при точении 12Х18Н10Т резцом из Т14К8 применение газожидкостной смеси повысило стойкость при скорости резания V = 145 м/мин в 2,0 раза по сравнению с применением обычной СОЖ. Оценка стойкости инструмента проводилась по времени до достижения предельного износа по задней поверхности (h_3 = 0,3 мм), что соответ-

ствует стандартной методике определения стойкости при точении жаропрочных и нержавеющих сталей.

Полученные результаты согласуются с исследованиями, проведенными в России и Узбекистане, где также отмечено значительное влияние состава и способа подачи смазочно-охлаждающих жидкостей на тепловой баланс в зоне резания. Так, в работах Э.Р. Бабаева показано, что повышение теплофизических свойств СОЖ и ее целенаправленная подача в наиболее нагретые участки инструмента обеспечивают более интенсивное отведение тепла и снижают температуру резания на 10–15 % [4].

В отечественных исследованиях А.С. Менглиева и соавторов (ТГТУ) представлена методика получения новых составов СОЖ с добавлением поверхностно-активных веществ, что способствует улучшению смачиваемости поверхности инструмента и ускоряет разрушение ламинарного пограничного слоя. Это повышает эффективность теплообмена между инструментом и охлаждающей жидкостью и снижает температуру в зоне контакта до 20 % [5].

Дополнительно отмечено, что применение водно-воздушных смесей и микропузырьковой подачи СОЖ позволяет не только стабилизировать тепловое состояние инструмента, но и снизить энергоемкость процесса резания. В работе А.Ю. Клюева и др. показано, что оптимизация состава газожидкостной смеси и режима подачи позволяет достичь равномерного распределения температуры по длине режущей кромки, что приводит к увеличению стойкости инструмента до 2,5 раз [6].

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтверждают эффективность применения комбинированных СОЖ для интенсификации теплообмена и увеличения долговечности инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов.

Список источников

[1] Xu K., Liu X., Zhang J., Li W., Wang Y. Internal cooling techniques in cutting process: a review. Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 1–25. https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024013

[2] Sharma V.S., Dogra M., Suri N.M. Cooling techniques for improved productivity in turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, vol. 49, no. 6, pp. 435–453.

[3] Kui G.W.A., Chong W.T., Law K.H., Teoh Y.H. Recent progress and evolution of coolant usages in conventional machining processes. Processes, 2021, vol. 9, no. 10, art. no. 1733. https://doi.org/10.3390/pr9101733

[4] Бабаев Э.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости: свойства и методы применения. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2022, т. 22, № 4, с. 812–820.

[5] Менглиев А.С., Суюнова З.М., Алиева М.Т., Мусаева Г.А. *Разработка новых смазочно-охлаждающих жидкостей для применения в механической обработке деталей.* Ташкент, ТГТУ, 2023, 8 с.

[6] Клюев А.Ю., Кондратьев С.И., Семенов Н.П. *Исследование свойств и разработка технологии смазочно-охлаждающей жидкости на водной основе СОЖ ЛХ-2 с применением аддукта ОКМА.* Минск, Белорусский государственный технологический университет, 2022, 10 с.

Study of the possibilities for intensifying heat exchange when using a cutting fluid

Zakharova Margarita Eduardovna vin.m@bmstu.ru
Inagamov Umid Shavkatovich sabrinakamalitdinova@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The influence of cutting fluid (CF) supply methods on the thermal regime of cutting tools during machining of hard-to-cut materials has been considered. The results of experiments during the turning of 12Kh18N10T steel using a gas–liquid mixture are presented, demonstrating a reduction in temperature in the contact zone between the tool and the workpiece. It is shown that the use of CF in the form of a mechanical mixture with air contributes to the local destruction of the laminar boundary layer and intensifies heat transfer. It is concluded that the application of a gas–liquid mixture can increase the tool life up to two times and is recommended for improving cooling efficiency during high-speed machining.

Keywords: *heat transfer, cutting fluid, gas–liquid mixture, cutting processing, temperature durability*

УДК 621

Обеспечение качества зубчатых колес при зубофрезеровании с учетом повышения их износостойкости.

Туркин Даниил Игоревич turkindi@student.bmstu.ru
Калмыков Вадим Владимирович kalmykovvv@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено влияние режимов зубофрезерования червячной фрезой на шероховатость боковых поверхностей зубьев и их износостойкость на примере зубчатого колеса тихоходной ступени редуктора общего назначения. Режимы зубофрезерования оптимизированы по критерию интенсивности изнашивания в период приработки и нормальный период. Показано, что варьировании режимов интенсивность изнашивания и ресурс изменяются в относительно широком пределе. Таким образом, у технологов имеется возможность повышения ресурса колеса за счет подбора режимов зубофрезерования.

Ключевые слова: *редуктор, зубчатое колесо, зубофрезерование, режимы, интенсивность изнашивания*

В процессе работы боковые поверхности зубьев колеса и шестерни редуктора образуют пару трения и, как следствие, изнашиваются. Износ возникает по следующим причинам:

– наличие сил и контактного давления в зубчатом зацеплении;

– попадание посторонних частиц в полость редуктора (загрязнение масла). Посторонние частицы вызывают повреждение боковых поверхностей зубьев при попадании между ними;

– масляное голодание.

Для повышения ресурса работы зубчатой передачи требуется повышение износостойкости контактирующих поверхностей. Износостойкость — это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Согласно ГОСТ 23.002-78, интенсивность изнашивания — это отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы. Известно, что помимо параметров конструкции, износостойкость поверхностей определяется и технологией их изготовления, в частности, методом и условиями обработки изнашиваемой поверхности.

На основе литературного обзора установлено, что существует явная зависимость эксплуатационных свойств деталей, в том числе износостойкости, от параметров качества исполнительных поверхностей, которые, в свою очередь, зависят от метода и условий обработки [1–6]. Таким образом, у технолога имеется возможность влиять на эксплуатационные свойства деталей за счет выбора метода обработки и/или варьирования режимов обработки (при

условии обеспечения технических требований чертежа). Однако на практике, как правило, выбор режимов обработки осуществляется исходя только из условия обеспечения технических требований чертежа детали, экономических и прочих соображений.

В работе проведена оптимизация режимов зубофрезерования по критерию износостойкости (интенсивности изнашивания). В качестве примера рассмотрено зубчатое колесо тихоходной ступени редуктора привода ленточного транспортера. Согласно чертежу детали, задана 9-я степень точности зубьев и шероховатость боковых поверхностей зубьев в пределах *Ra* 3,2. Данные параметры качества обеспечиваются зубофрезерованием. На основе размеров зубьев колеса, силы и момента в зацеплении рассчитано значение контактного давления на боковой стороне зубьев. С учетом контактного давления рассчитано значение равновесной шероховатости, которое было сопоставлено с шероховатостью зубьев на чертеже детали [4]. Это значение шероховатости, которая формируется на трущихся поверхностях в конце периода приработки. Сделан вывод об обоснованности назначения шероховатости конструктором.

В процессе оптимизации режимов зубофрезерования для каждого режима был определен допустимый диапазон значений и шаг варьирования. В данном случае варьировались два режима — подача и скорость вращения червячной фрезы. Таким образом, формируется некоторое множество комбинаций режимов. При этом, как известно, при выборе режимов технолог назначает только одну комбинацию режимов из множества существующих комбинаций. Для каждой комбинации режимов рассчитывалась или назначались значения параметров качества обрабатываемой поверхности — шероховатости *Ra*, поверхностной микротвердости, волнистости, шага неровностей, относительной опорной длины профиля [1]. По значениям параметров качества и контактному давлению на поверхности рассчитывалась интенсивность износа в период приработки и нормального изнашивания [1]. Рассчитывался ресурс колеса как отношение допустимого износа к интенсивности изнашивания. Среди всех комбинаций режимов зубофрезерования червячной фрезой выбрана комбинация, при которой значения интенсивности износа минимальные и, как следствие, обеспечивается максимальный расчетный ресурс.

Показано, что значения интенсивности изнашивания в период приработки и в период нормального износа при варьировании режимов зубофрезерования изменяются в относительно широких пределах. Это свидетельствует о важном значении режимов обработки в обеспечении эксплуатационных свойств детали, в частности, износостойкости.

Список источников

[1] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин.* Москва, Машиностроение, 2000, 320 с.

[2] Суслов А.Г., Дальский А.М. *Научные основы технологии машиностроения.* Москва, Машиностроение, 2002, 684 с.

[3] Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В., Бишутин С.Г. *Инженерия поверхности деталей.* Москва, Машиностроение, 2008, 320 с.

[4] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. *Основы расчетов на трение и износ.* Москва, Машиностроение, 1977, 523 с.

[5] Клюев В.В. *Машиностроение. Надежность машин. Т. IV-3. Энциклопедия.* Москва, Машиностроение, 2003, 592 с.

[6] Минаков А.П., Лустенков М.Е., Камчицкая И.Д., Афанасьев П.В. Волнистость и оценка ее влияния на эксплуатационные свойства деталей машин. *Вестник Белорусско-Российского университета*, 2020, № 3(68), с. 65–75.

Ensuring gear wheels quality during hobbing taking into account increase their wear resistance

Turkin Daniel Igorevich turkindi@student.bmstu.ru
Kalmykov Vadim Vladimirovich kalmykovvv@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The influence of hobbing modes with a worm milling cutter on the side surfaces roughness of the teeth and their wear resistance is considered using the example of a gear wheel of a low-speed stage of a general-purpose reducer. The hobbing modes are optimized according to the criterion of wear intensity during the running-in period and the normal period. It is shown that the variation of the modes, the wear rate and the service life vary over a relatively wide range. Thus, process engineers have the opportunity to increase the life of the wheel by selecting hobbing modes.

Keywords: *reducer, gear wheel, hobbing, modes, wear rate*

УДК 61.713

Анализ основных типов СОТС и их влияние на процессы резания

Иванов Юрий Васильевич bdfyjd.d@bmstu.ru
Иванова Елизавета Игоревна ivanovaei1@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена смазочно-охлаждающим техническим средствам (СОТС) как одному из самых конструктивных показателей улучшения механообработки. Рассмотрены основные виды СОТС, его классификация, а также их физические и химические свойства. Приведены преимущества и недостатки методов подвода СОТС к детали при механической обработке резанием, а также влияние его состава на скорость резания, качество отвода стружки и особенности полученной модели. Перечислены основные примеры используемых СОТС на производстве.

Ключевые слова: *смазочно-охлаждающие технические средства, СОТС, СОЖ, классификация СОТС, виды СОТС, механическая обработка, обработка, улучшение качества*

Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) влияют на стойкость режущих инструментов, качество и скорость механообработки. В настоящее время находят применение СОТС на основе: газов, жидкостей и твердых смазок [1]. В качестве газообразных СОТС можно использовать: воздух, углекислый газ, и инертные газы [2]. При взаимодействии с металлами активные газы оказывают не только охлаждающее действие, но и смывающее действие, что снижает температуру в зоне контакта. Преимуществом их является чистота процесса.

Пластичные СОТС можно поделить на группы: смазки на углеводородных загустителях (парафин, церезин, воск и полимеры), смазки на малых загустителях (кальциевые, литиевые, натриевые и алюминиевые), смазки на неорганических загустителях (силикагель, асбест, бентонитовые глины или сажа). Такие смазки тяжело подать к рабочему узлу и невозможно использовать повторно. Также они имеют меньшую теплопроводность, чем СОЖ, быстро загустевают, тем самым мешая дальнейшей обработке и увеличивая скорость разрушения трущихся поверхностей.

К твердым СОТС относятся неорганические минеральные со слоистой структурой (дисульфид молибдена, вольфрама, тальк, слюда, графит, нитрит титана, селениды, теллуриды вольфрама), твердые органические соединения (мыла, воски, парафины, церезины), пленочные покрытия из нитридов, оксидов, и карбидов металлов [2].

Смазочно-охлаждающие жидкости делят по составу: на основе воды и на основе масла [3].

Маслянистые изготавливаются на основе минеральных масел (сульфофрезолы, МР-1, ОСМ-3) и синтетических масел (Аквол-14, аквол-10м, EFELE

CF-621). Они имеют повышенный смазывающий эффект и пониженное охлаждающее действие. Такие виды СОЖ следует заменять через 3–6 месяцев после эксплуатации.

СОЖ на основе воды включают в себя масляные эмульси и растворы электролитов [2]. Они обладают повышенных охлаждающим эффектом. Обычно это концентраты, которые доставляются на производства и уже после перед применением их разбавляют специально подготовленной водой в определенных пропорциях.

Растворы электролитов снижают коррозию. Полусинтетические и синтетические СОЖ применяют при высоких скоростях резания, но синтетические в большей степени для финишных операций [3].

Одним из главных вопросов при правильном выборе СОТС является способ его подвода в зону резания и его эффективность.

Газообразная смазочно-охлаждающая технологическая смесь, как правило, использует наночастицы в аэрозолях или поток газа. Можно выделить такие распространенные типы газообразных СОТС как: сжатый воздух — является самым распространенным, инертные газы, такие как азот и аргон — предотвращает окисления, углекислый газ, жидкий азот — в зону обработки подается уже в виде струи или аэрозоля, воздушно-масляные туманы — смесь воздуха с микрокаплями масла [2].

Пластичные смазочно-охлаждающие технические среды могут подаваться на инструмент вручную и при помощи погружения его в смазку, пропитываться, с целью заполнения пор на поверхности абразивных инструментов. Если материал магнитоактивен, то возможна подача магнитным способом — создание внешнего магнитного поля, которое затягивает смазку с магнитоактивной добавкой в зону резания.

Одним из наиболее широко применяемым видом СОТС является смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Подвод СОЖ в зону резания может быть осуществлен различными методами: поливом, подача под давлением, внезонная подача СОЖ, подача по каналам режущего инструмента, распыленная подача СОЖ в виде аэрозолей [2, 3]. Свободно падающая струя подается в зону резания простым поливом при давлении 0,02–0,03 МПа, а эффективность зависит от расхода СОТС, размеров, формы и траектории струи. Подача под напором происходит через сопловые насадки под давление 0,1–2,5 МПа, применяется, когда необходимо достать до труднодоступных мест [4, 5]. Распыление, это подача СОЖ в виде микроскопических капель при помощи специального оборудования.

Подача по каналам режущего инструмента это подача смеси непосредственно в зону резания, что обеспечивает хорошую смазку, охлаждение зоны резания и лучший отвод стружки.

Заключение. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что самым высокоэффективным типом СОТС, являются смазочно-охлаждающие жидкости, так как имеют самые высокие показатели теплоотвода, минимальные коэффициенты трения между инструментом и заготовкой и затупление инстру-

мента, а также выведение стружки из зоны резания. В связи с этим, предлагается конструкция инструмента торцовой фрезы с внутренним подводом СОЖ.

Список источников

[1] Булыжев Е.М., Меньшов Е.Н. *Технологии и техника ресурсосберегающего экологизированного применения смазочно-охлаждающих жидкостей при абразивной обработке*. Ульяновск, УлГТУ, 2023, 244 с.

[2] Древаль А.Е., Скороходов Е.А., Агеев А.В. *Краткий справочник металлиста*. Москва, Машиностроение, 2005, с. 885–952.

[3] Бердичевский Е.Г. *Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов*. Москва, Машиностроение, 1984, 436 с.

[4] Виноградов Д.В. *Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 93 с.

[5] Барсов А.И. *Технология инструментального производства*. Москва, Машиностроение, 1975, 272 с.

Analysis of the main types of cutting fluids and their effect on cutting processes

Ivanov Yuri Vasilyevich bdfyjd.d@bmstu.ru
Ivanova Elizabeth Igorevna ivanovaei1@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article is devoted to lubricating and cooling technical means (LCTS), as one of the most constructive indicators of improving mechanical processing. The main types of LCTS, their classification, as well as their physical and chemical properties, are considered. The advantages and disadvantages of methods of supplying LCTS to a part during machining by cutting, as well as the influence of its composition on the cutting speed, the quality of chip removal and the features of the obtained model, are given. The main examples of LCTS used in production are listed.

Keywords: *lubricants and cooling equipment, STS, STS classification, types of STS, mechanical processing, processing, quality improvement*

УДК621.9

Анализ методов чистовой лезвийной обработки и способов повышения ее производительности

Иванов Кирилл Андреевич ezic.rift@yandex.ru
Иванов Юрий Васильевич bdfyjd.d@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проанализированы следующие инновационные решения, позволяющие увеличить режимы обработки без потери качества: 1) геометрия безвершинного резца: применение специальной формы режущей части, которая способствует повышению режимов; 2) сверхтвердые материалы: использование инструмента, оснащенного поликристаллическими композитами на базе кубического нитрида бора, эти материалы критически важны для работы на высоких скоростях резания; 3) защитные покрытия: применение специализированных защитных покрытий, которые повышают износостойкость инструмента и его способность работать в интенсивных режимах.

Ключевые слова: *лезвийный инструмент, производительность, чистовая обработка, режимы резания, шероховатость поверхности*

Введение. Совершенствование технологий финишной обработки, как и любых технических систем, базируется на стремлении достичь максимального результата при минимальных затратах ресурсов. В контексте завершающих операций это подразумевает необходимость обеспечения высокой производительности процесса удаления материала при одновременном формировании поверхности детали, соответствующей установленным техническим параметрам и гарантирующей надежность эксплуатации конечного изделия [1].

Современные методы окончательной обработки строятся на глубоком понимании природы контактных взаимодействий, включающих механические и физико-химические процессы, воздействие окружающей среды, а также механизмы износа режущего инструмента и закономерности трансформации поверхностного слоя. Эти фундаментальные знания способствуют разработке нового поколения режущего инструмента, способного эффективно работать как с обычными, так и с упрочненными материалами в условиях как спокойного, так и прерывистого резания. Такой подход часто позволяет заменить шлифование лезвийной обработкой, что существенно упрощает механику и компоновку технологического оборудования.

Эффективность финишной обработки определяется объемом обработанной поверхности за единицу времени. Таким образом, скорость резания и величина подачи выступают ключевыми параметрами, оказывающими влияние как на производительность процесса, так и на качество получаемой поверхности.

Оптимальное соотношение между скоростью обработки и требуемым качеством поверхности в значительной степени зависит от характеристик

инструмента: его материала и геометрии, которые должны быть тщательно подобраны с учетом специфики конкретной технологической операции.

Влияние подачи на качество поверхности. При традиционной лезвийной обработке формирование микронеровностей на обработанной поверхности в основном обусловлено двумя основными факторами:

– геометрическое копирование параметров рабочего участка инструмента с учетом величины подачи;

– пластические деформации материала перед передней поверхностью режущего инструмента [2, 3].

Для уменьшения шероховатости поверхности рекомендуется применение безвершинного инструмента (бреющего типа) [4]. При этом необходимо учитывать следующие параметры:

– активная длина режущей кромки определяет максимально возможную величину подачи;

– угол наклона режущей кромки влияет на возможность увеличения подачи без ухудшения качества поверхности.

Для повышения производительности обработки при сохранении качества поверхности рекомендуется:

– придать режущей кромке специальную форму, учитывающую радиус обрабатываемой детали [5];

– использовать комбинацию криволинейного и прямолинейного участков режущей кромки [6].

Оптимальная форма режущей кромки должна соответствовать следующим требованиям:

– криволинейный участок должен иметь радиус, равный радиусу кривизны эллипса в точке пересечения с малой полуосью;

– прямолинейный участок располагается ниже точки пересечения режущей кромки с осью детали.

При соблюдении данных рекомендаций возможно значительное повышение производительности обработки без ухудшения качества получаемой поверхности.

Повышение скорости резания. Для увеличения скорости резания как способа повышения производительности, необходимо рассмотреть инструменты, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора.

Понимание механизмов изнашивания позволяет контролировать эксплуатационные характеристики инструментов как на этапе их изготовления, так и непосредственно при работе.

Ключевой метод повышения производительности (через рост скорости резания) заключается во введении специальных веществ (ингибиторов):

– в состав ПСТМ;

– в технологическую среду.

Эти ингибиторы либо блокируют реакции взаимодействия материала инструмента с обрабатываемой деталью и окружающей средой, либо сдвигают эти реакции в область более высоких температур.

Заключение. Проведенный анализ выявил, что существует большой неиспользованный потенциал для ускорения финишной обработки резанием. Суть повышения эффективности заключается в следующем:

– увеличение подачи: использование бреющего резания позволяет увеличить подачу, не ухудшая, а наоборот, улучшая качество поверхности (снижая шероховатость) при одновременном значительном росте скорости всей операции;

– применение современных режущих инструментов с рабочей частью из специализированных композитных материалов, учитывающих физические явления, происходящие непосредственно в месте контакта, а также новые виды защитных покрытий, что позволяет инструментам выдерживать очень высокие скорости резания.

Список источников

[1] Клименко С.А. *Повышение производительности финишной обработки деталей лезвийным инструментом.* Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017, 11 с.

[2] Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. *Технологические методы повышения износостойкости режущего инструмента.* Старый Оскол, ТНТ, 2011, 379 с.

[3] Новикова Н.В., Клименко С.А., ред. *Инструменты из сверхтвердых материалов*. Москва, Машиностроение, 2014, 608 с.

[4] Ляшенко Б.А., Новиков Н.В., Клименко С.А. *Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов.* Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017, 264 с.

[5] Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. *Вакуумно-дуговые устройства и покрытия*. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2005, 236 с.

[6] Петрушин С.И., Филиппов А.В. *Анализ геометрии косоугольного обтачивания безвешинными резцами.* Юрга, ЮТИ (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2012, 6 с.

Analysis of methods of finishing blade processing and ways to increase its productivity

Kirill Andreevich Ivanov ezic.rift@yandex.ru
Ivanov Yuri Vasilyevich bdfyjd.d@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The paper analyzes the following innovative solutions that make it possible to increase processing modes without loss of quality. 1) The geometry of the topless cutter: the use of a special shape of the cutting part, which helps to increase the operating modes. 2) Superhard materials: Using tools equipped with polycrystalline composites based on cubic boron nitride, these materials are critically important for high cutting speeds. 3)Protective coatings: the use of specialized protective coatings that increase the wear resistance of the tool and its ability to work in intensive modes.

Keywords: *blade tool, productivity, finishing, cutting modes, surface roughness*

УДК 621.9

Твердые сплавы отечественного производства

Иванов Кирилл Андреевич ezic.rift@yandex.ru
Иванов Юрий Васильевич bdfyjd.d@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлен анализ современных твердых сплавов для металлообработки, производимых в России после ухода зарубежных производителей. Рассмотрены классификация, состав и области применения различных групп твердых сплавов, представлена их основная характеристика. Выполнена оценка целесообразности использования отечественных материалов в современных производственных условиях. Определены основные предприятия-производители инструментальных сплавов, работающих в настоящее время в России. Отмечено, что производимые ими твердые сплавы по своим характеристикам соответствуют требованиям современного производства.

Ключевые слова: *инструментальные материалы, металлообработка, композитные сплавы, карбидные соединения, механическая обработка, режущий инструмент, импортозамещение*

В современных условиях металлообработки твердые сплавы выступают ключевым материалом для обеспечения высокой производительности производственных процессов. Их применение позволяет достигать оптимальных показателей качества и эффективности обработки различных материалов [1, 2].

Основные группы [3]:

– вольфрамокобальтовые — базовые материалы для обработки чугуна и цветных сплавов;

– титановольфрамокобальтовые — универсальные сплавы для работы по сталям;

– титанотанталовольфрамокобальтовые — высокопрочные материалы для тяжелых режимов резания;

– безвольфрамовые —на основе TiC и TiCN.

Основные характеристики. Вольфрамокобальтовые сплавы (группа ВК) характеризуются:

– основа карбид вольфрама связка кобальт;

– теплостойкость: 800–850 °С;

– применение: обработка чугуна, цветных и титановых сплавов.

Титановольфрамокобальтовые сплавы (группа ТК):

– трехкомпонентный состав: твердый раствор TiC-WC, карбид вольфрама, кобальт;

– теплостойкость: до 900 °С;

– основное применение: обработка сталей.

Танталосодержащие сплавы:

– состав: твердый раствор TiC-TaC-WC, связка кобальт;

– теплостойкость: 750 °С;

– применение: тяжелые режимы резания, фрезерование.

В связи с дефицитностью вольфрама и кобальта, промышленность выпускает безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой.

По твердости БВТС находятся на уровне вольфрамосодержащих сплавов (группы ВК), по прочностным характеристикам им уступают. Твердость БВТС при повышенных температурах несколько ниже, чем твердость вольфрамосодержащих сплавов.

Из БВТС изготовляют в основном сменные неперетачиваемые пластины (СМП).

Работы по совершенствованию БВТС обеспечили появление новых сплавов [4]:

– ЛЦК20, у которого карбонитридная фаза легирована цирконием;

– ТВ4 связка легирована карбидом вольфрама;

– ЦТУ связка легирована вольфрамом;

– НТН30 связка легирована карбидами титана и ниобия.

Классификация. В соответствии с ГОСТ 3882 отечественные твердые сплавы подразделяются по химическому составу. В настоящее время многие отечественные производители подразделяют твердосплавный инструмент по применению его для обработки конкретного материала. Область применения сплавов основывается на международной системе классификации по ISO 513, которая предусматривает шесть основных групп применения [5]:

– группа Р (синий цвет) — для обработки сталей;

– группа М (желтый) — для коррозионностойких сталей;

– группа К (красный) — для чугуна;

– группа N (зеленый) — для сплавов на основе меди и алюминия;

– группа S (оранжевый) — для жаропрочных и титановых сплавов;

– группа Н (серый) — для твердых материалов.

Каждая группа применения делится на подгруппы, обозначаемые индексом от 01 до 40 (50), с увеличением индекса условия обработки становятся более тяжелыми.

Кроме подгрупп применения необходимо знать тип обработки (чистовая, получистовая, легкая черновая и черновая), который позволяет ориентироваться в величинах глубины резания (t, мм) и подачи (S_0, мм/об) (табл. 1).

Таблица 1

Тип обработки

Параметры режима резания	Тип обработки			
	Чистовая	Получистовая	Легкая черновая	Черновая
Глубина t, мм	0,25–2,0	0,5–3,0	2,0–6,0	5,0–10,0
Подача S_0, мм/об	0,05–0,15	0,1–0,3	0,2–0,5	0,4–1,8

Заключение. В условиях импортозамещения особое значение приобретает развитие отечественного производства твердых сплавов. Основными производителями твердых сплавов в России в настоящее время являются: ВНИИТС, АКСИС, Завод «Победит», КЗТС, СКИФ-М (табл. 2).

Таблица 2

Марки сплавов, производимых в РФ

ВНИИТС	АКСИС	Завод «Победит»	КЗТС	СКИФ-М	Область применения
Сплавы для точения					
ВТ100	АСР15		Н10		Р01-Р05
ВТ110, ВТ113, ВТ2200*, ВТ2220*, ВТ2222*	АСР15 АРМ20	–	ТС20РТ-Р	–	Р10-Р20
ВТ120, ВТ1320*, ВТ1322*	АСР25	ВП1255*	ТС20РТ, Н20	–	Р15-Р25
ВТ130, ВТ1320*, ВТ1322*, ВТ1412*	АСР35	ВП1255*, ВП1325*	ТР20АМ, ТС40РТ-Р, ТР35АМ, ТС33РТ, Н30	–	Р20-Р40
ВТ141, ВТ142, ВТ1410*, ВТ1412*	АСР35	ВП1455*	ТР40АМ, ТС40РТ	–	Р25-Р40
ВТ210	АРМ15	–	АР10АТ	–	М05-М15
ВТ141, ВТ220, ВТ231, ВТ2220*, ВТ1410	АРМ20	–	ТС20РТ-Р, ТС40РТ-Р, АР30АМ, ТР20ТТ, ВР20ТТ, В20	–	М10-М30
ВТ231	АСМ25		ТР35АМ, ВР35ТТ, А30, В35	–	М15-М45
ВТ301	АСК10	–	–	–	К01-К05
ВТ310	АСК10		АР10АМ	–	К05-К15
ВТ320, ВТ322, ВТ3200*, ВТ3205*, ВТ3220*, ВТ3225*	АСК15	ВП3115*	ВС20НТ	–	К10-К20

Продолжение табл. 2

ВНИИТС	АКСИС	Завод «Победит»	КЗТС	СКИФ-М	Область применения
ВТ231, ВТ332, ВТ2310,ВТ2312	АСК25	ВП3325*	ВС35НТ, В20, В35	–	К20-К35
–	AWN20	–	А10	–	N05-N20
–	AWN25	–	А30	–	N15-N30
–	APS10	–	АР10АМ	–	S05-S15
–	APM20 APS20	–	ТС20РТ-Т, АР30АМ, ВС20РТ, В20	–	S10-S25
–	–	–	ТС40РТ-Т, ВС35РТ, А30, В35	–	S15-S35
–	–	–	АР10АТ	–	H10-H15
–	–	–	АР30АТ	–	H15-H20
Сплавы для фрезерования					
ВТ113	–	–	ТР20АМ, Н10	–	Р05-Р15
ВМ125, ВМ126, ВМ2206*	АРК20 АСР20	–	–	HCP20, HCP25, HCP25C, HCP25N, HWP20	Р10-Р15
ВТ120	APP25 APM25 APM30	–	Н20	HCP20, HCP25, HCP25C, HCP25N, HCP25U, HCP30, HCM25N, HWP20, HWP25, HWP30	Р20-Р30
ВТ130	APP25 APM25 APM30	–	Н30	HCP25, HCP25C, HCP25N, HCP25U, HCP30, HCP35,	Р25-Р35

Продолжение табл. 2

ВНИИТС	АКСИС	Завод «Победит»	КЗТС	СКИФ-М	Область применения
ВТ130	АРР25 АРМ25 АРМ30	–	Н30	HCP35N, HCM25N, HWP25, HWP30, HWP35	Р25-Р35
ВТ141,ВТ142, ВМ416*, ВМ417*	АРМ30	–	ТР35DM, ТР40АМ, ТС35ЕМ, ТС40ЕМ	HCP25, HCP30, HCP35, HCP35D, HCP35N, HCP35U, HCP40, HWP30, HWP35, HWP40	Р30-Р50
–	–	–	АР10АМ	–	М05-М20
ВТ141, ВТ220, ВТ231, ВМ1416*, ВМ2206*, ВМ2316*	АРМ25 APS25	–	ТР20АМ	HCP20, HCP25, HCP35N, HCM25N	М10-М30
ВТ142, ВТ231	АСМ30 FPM30	–	АР30АМ, ТР40АМ, ВР35АМ, В35	HCP35D, HCP40, HCM35, HCM35N, HCM40, HCM40N, HCS30, HWS30	М20-М45
ВТ310	АСК15 АРК20	–	АР10АМ	HCK10, HCK10N, HCK15, HWK15	К05-К20
ВМ315, ВТ321, ВМ3156*, ВМ3206*, ВМ3157*	АСК15 АРК20 АРР25		В35	HCP25C, HCP25N, HCK20, HCK20N, HWK20	К15-К30

Окончание табл. 2

ВНИИТС	АКСИС	Завод «Победит»	КЗТС	СКИФ-М	Область применения
BT231, BM2316*, BM2317*	APP25	–	BP35AM	–	K25-K40
–	AWN20	–	A10	HCN10, HCN15	N05-N20
–	AWN20 AWN25	–	A30	–	N20-N35
–		–	AP10AM		S05-S15
–		–	TP20AM	HCS30A	S10-S20
–	APS25 APM25 APM30 ACM30	–	AP30AM, TP40AM, B35	HCS30, HCS30A	S20-S30
–	APS25 APM25 APM30 ACM30	–	BP35AM	HCS35, HWS30	S25-S35
–		–			H05-H15
–	APH20	–	AP10AM	HCH15	H10-H20

Анализ показывает, что отечественные производители способны обеспечить машиностроительные предприятия полным спектром твердых сплавов для различных условий обработки. Современные материалы по своим характеристикам соответствуют требованиям современного производства.

Список источников

[1] Верещака А.С., Кушнер В.С. *Резание материалов.* Москва, Высшая школа, 2009, 535 с.

[2] Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Леонов А.Ф., Ерофеев В.К. *Инструментальные материалы.* Москва, Инфра-М, 2016, 268 с.

[3] ГОСТ 3882–74. *Сплавы твердосплавные спеченные. Марки.* Москва, ИПК Изд-во стандартов, 1993, 12 с.

[4] Зубарев Ю.М. *Современные инструментальные материалы.* Санкт-Петербург, Лань, 2025, 304 с.

[5] Зубков Н.Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 5, с. 75–100.

Hard alloys of domestic production

Ivanov Kirill Andreevich ezic.rift@yandex.ru
Ivanov Yuri Vasilyevich bdfyjd.d@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The paper presents an analysis of modern hard alloys for metalworking produced in Russia after the departure of foreign manufacturers. The classification, composition and applications of various groups of hard alloys are considered, and their main characteristics are presented. An assessment of the expediency of using domestic materials in modern production conditions has been carried out. The main manufacturers of tool alloys currently operating in Russia have been identified. It is noted that the hard alloys produced by them meet the requirements of modern production in their characteristics.

Keywords: *tool materials, metalworking, composite alloys, carbide compounds, machining, cutting tools, import substitution*

УДК 621.923.1

Сравнительный анализ шероховатости поверхности и технологического времени при плоском и круглом шлифовании заготовок из различных материалов

Новгородова Мария Васильевна novgmary@gmail.com
Бабинов Артем Евстафьевич babinov0777@gmail.com
Калмыков Вадим Владимирович kalmykovvv@bmstu.ru
SPIN-код: 1161-2902

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследовалась шероховатость поверхностей различных материалов, таких как конструкционная сталь 45, инструментальная сталь У8А, Р6М5, титановый сплав ТС5, после двух видов шлифования: круглом наружном и плоском периферийном. Также исследовалось расчетное и действительное технологическое время шлифования. Представлены результаты экспериментальных исследований на шлифовальных станках с фиксацией режимов резания и измерением шероховатости поверхности. Показано, что круглое шлифование обеспечивает на 10–15 % меньшую шероховатость для титанового сплава, однако характеризуется большим разбросом значений. Сделаны выводы, что полученные данные можно применять для оптимизации режимов шлифования. Сформулированы практические рекомендации для производственных условий.

***Ключевые слова**: шлифование, круглое шлифование, плоское шлифование, шероховатость, технологическое время*

После обработки поверхности точением, после литья, спекания и т. д. на полученной заготовке существует некоторая шероховатость, которая может мешать дальнейшей эксплуатации детали. Несмотря на то что при точении можно добиться минимальной шероховатости [1, 2], эта проблема остается при остальных методах изготовления деталей. Для получения гладких поверхностей используется шлифование. Оно обеспечивает высокие требования к качеству поверхности детали: шероховатость *Ra* достигает 1,0–2,5 мкм при предварительном, 0,2–1,25 мкм при чистом и 0,05–0,25 мкм при тонком шлифовании соответственно [3]. Существует потребность в уменьшении технологического времени обработки материалов. Избыточное значение данного параметра не позволяет оптимально выбирать технологические процессы в производстве. Решение данной проблемы приведет к увеличению производительности на заводах, росту стабильности производства высокого качества продукции и снижению затрат и времени изготовления готовых изделий.

Исследования шлифования как никогда актуально для создания изделий как широкого пользования [4], так и специальных изделий [5]. Современные исследования позволяют моделировать процессы резания, учитывая случайное распределения зерен на поверхности инструмента [6, 7], подбирать оптимальные режимы обработки при различных видах шлифования [8, 9].

Целью данной работы является рассмотрение и сравнение результативности двух методов шлифования, плоском и круглом, на примере различных материалов для расчета технологического времени.

Научная новизна заключается в прямом сравнении влияния метода обработки на параметры шероховатости и технологического времени

Примером современных исследований шероховатости поверхностей является [8], разработанные методики и математические модели позволяют определять оптимальные режимы плоского; или же [10], где рассматривается возможность шлифовки с требуемой точностью; [9] позволяет рассчитать необходимые параметры шлифования направляющих линейных подшипников малой жесткости. Эти примеры показывают, что актуализация научных данных в области шлифования — востребованная тема исследования в современном машиностроении.

Был проведен ряд экспериментов, изучающих шероховатость поверхности материалов сталь 45, Р6М5/У8А, ТС5 на круглошлифовальном станке 3А110 и плоскошлифовальном 3П9, для последующего анализа полученных результатов, их сравнения и расчета технологического времени. Шероховатость поверхностей замерялась на профилометре ISR-C002.

Шлифовальные круги 1 250×32×76, марка абразива 25А, зернистость 25мкм, твердость СМ1, структура 7, марка связки К. Каждый эксперимент повторялся трижды. Порядок проведения экспериментов рандомизировался. Режимы резания были выбраны с помощью источника [11].

На круглошлифовальный станок были закреплены заготовки из стали 45, Р6М5, ТС5. На плоскошлифовальный из стали 45, У8А, ТС5.

Характеристики заготовок указаны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики заготовок

Материал	Диаметр и длина шлифования $d \times l$, мм	Твердость НВ, МПа	Прочность σ_b, МПа
Круглошлифовальный станок			
Сталь 45	$d = 30{,}6$ $l = 59$	2000	600
Р6М5	$d = 34{,}41$ $l = 61{,}9$	3200	900
ТС5	$d = 21{,}51$ $l = 62{,}9$	3410	>930
Плоскошлифовальный станок			
Сталь 45	$d = 27$ $l = 129$	2000	600
У8А	$d = 79$ $l = 99$	3200	900
ТС5	$d = 49$ $l = 119$	3410	>930

Шероховатость поверхности заготовок до обработки на круглошлифовальном станке Ra = 6,3 мкм, на плоскошлифовальном станке Ra = 1,25 мкм.

Режимы резания для круглошлифовального станка представлены в табл. 2, для плоскошлифовального — в табл. 3.

Таблица 2

Режимы резания для круглошлифовального станка

Материал	Частота круга n_k, об/мин	Скорость заготовки v_z, м/мин	Частота заготовки n_z, об/мин	Продольная подача S_{prod}, мм/об	Продольная подача S_m, мм/мин	Поперечная подача S_t, мм/дв.ход
Сталь 45	2840	15	150	14	2400	0,008
Р6М5		19	225	7	1600	0,005
ТС5		12,3	170	5	850	0,005

Таблица 3

Режимы резания для плоскошлифовального станка

Материал	Частота круга n_k, об/мин	Продольная подача S_m, мм/мин	Поперечная подача S_{pop}, мм/ход	Глубина шлифования S_t, мм
Сталь 45	3000	5375	12	0,04
У8А		6150		0,04
ТС5		4012		0,004

Шероховатость Ra, полученная после обработки, представлена в табл. 4.

Таблица 4

Шероховатость *Ra* после обработки

Материал	Шероховатость *Ra*, мкм		
Кругоршлифовальный станок			
Сталь 45	0,739	0,742	0,751
Р6М5	0,667	0,504	0,925
ТС5	0,467	0,473	0,719
Плоскошлифовальный станок			
Сталь 45	0,769	0,796	0,884
У8А	0,732	0,804	0,781
ТС5	0,494	0,580	0,566

По данным полученной шероховатости были построены гистограммы, представленные на рис. 1 и 2.

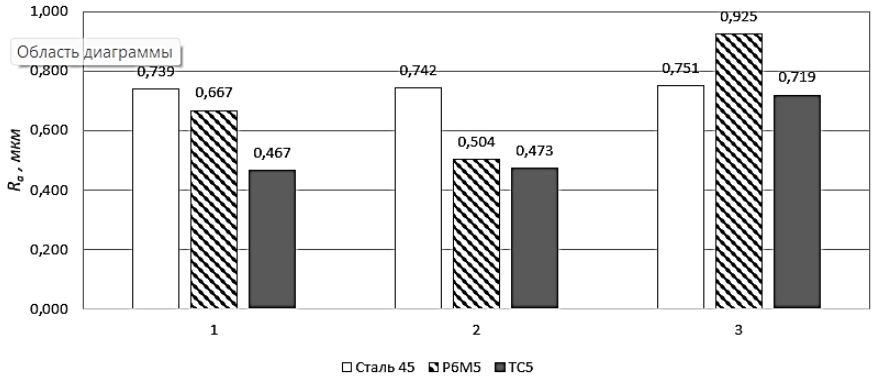


Рис. 1. Результаты шероховатости после обработки заготовки на круглошлифовальном станке

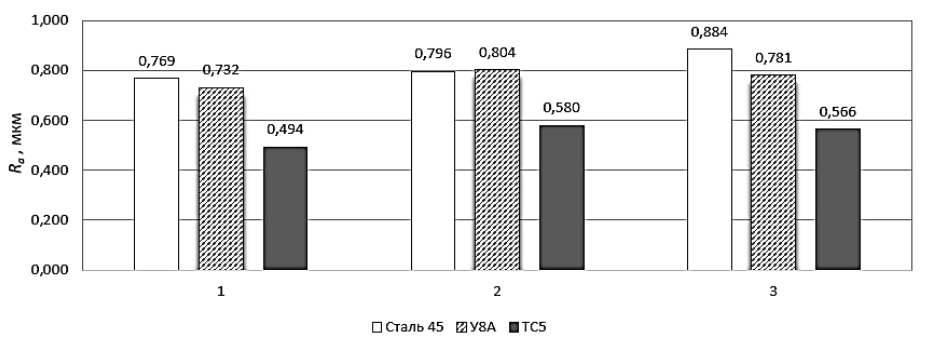


Рис. 2. Результаты шероховатости после обработки заготовки на плоскошлифовальном станке

При круглом шлифовании можно наблюдать разброс значений *Ra*. Титан является сложным в обработке, при его шлифовании происходит налипание на шлифовальный круг, что объясняет неоднородность показателей шероховатости поверхности. По сравнению со сталями титан требует меньших значений режимов резания.

Существует разброс значений шероховатости P6M5 после круглого шлифования. Он может быть связан с выкрашиванием зерен абразива из-за высокой твердости инструментальной стали, из-за чего вследствие происходил неравномерный износ круга, следовательно неравномерное шлифование.

Технологическое время T_0 [3] обработки образцов на шлифовальных станках рассчитывалось по специальным формулам. Результаты рассчитанного времени указаны в табл. 5.

По полученным данным видно, что расчетное время отличается от фактического. Отклонения вызваны комплексом факторов: стойкостью и состоянием абразивного инструмента, особенностями материала (вязкость, твердость, склонность к налипанию), жесткостью технологической системы «станок — приспособление — инструмент — заготовка».

Таблица 5

Технологическое время обработки на шлифовальных станках

Шлифование	Материал	Рассчитанное время, мин/дв.ход	Измеренное время обработки, мин/дв.ход
Круглое	Сталь 45	0,07	0,09
	Р6М5	0,07	0,08
	ТС5	0,07	0,12
Плоское	Сталь 45	0,34	0,25
	У8А	0,23	0,205
	ТС5	0,31	0,25

При плоском шлифовании происходит сокращение технологического времени в 1,2 раза по сравнению с расчетным, что подтверждается фактическими замерами.

Практические рекомендации для производственных условий:

– для титановых заготовок ТС5 необходимо использовать острые круги, обильную и эффективную подачу СОЖ и малые поперечные подачи. Для титана не рекомендуется работать по табличным данным. Стартовые режимы должны быть на 20–30 % ниже справочных для аналогичных по твердости сталей.

– для заготовок из конструкционной стали 45 можно опираться на справочные данные;

– для заготовок из инструментальных сталей Р6М5, У8А необходимы тонкая настройка режимов и контроль состояния круга для предотвращения выкрашивания.

Выводы.

1. Круглое шлифование в среднем обеспечивает на 10–15 % более низкую шероховатость для титанового сплава ТС5 по сравнению с плоским.

2. Круглое шлифование характеризуется большим разбросом значений шероховатости *Ra* и высокой нестабильностью процесса.

3. Фактическое технологическое время плоского шлифования в 1,2 раза меньше расчетного.

4. Для титанового сплава ТС5 необходимо выбирать режимы резания на 20–30 % ниже справочных для аналогичных по твердости сталей.

5. Конструкционная сталь 45 показывает стабильное качество поверхности при обоих видах шлифования. Режимы резания могут быть рассчитаны по справочным материалам.

6. Инструментальные стали Р6М5, У8А требуют постоянного контроля состояния шлифовального круга для предотвращения выкрашивания и обеспечения стабильности шероховатости.

Список источников

[1] Калмыков В.В. *Оценка парного эффекта влияния на шероховатость скорости резания и подачи*. Москва, Изд-во МГТУ им. НЭ Баумана, 2021, 19 с.

[2] Калмыков В.В., Исмаил А.Х.Д., Гроссман М.Ф. Эффекты взаимодействия технологических параметров на шероховатость поверхности при точении латуни. *Будущее машиностроения России. 15-я Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. участием): сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, т. 2, с. 66–70.

[3] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслова А.Г. *Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1.* Москва, Машиностроение, 2003, 944 с.

[4] Дальский А.М. *Технология конструкционных материалов*. Москва, Машиностроение, 2003, 512 с.

[5] Грубый С.В., Шавва М.А., Лапшин В.В. Сверхточная обработка поверхностей элементов устройств из оптических материалов. *5-я Междунар. конф. по промышленному инжинирингу (ICIE 2019): матер.* Челябинск, ЮУрГУ, 2020, с. 178–182.

[6] Воронов С.А., Киселев И.А., Воронова И.С. Стохастическая модель динамики плоского шлифования для анализа формирования текстуры. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2021, т. 38, с. 185–192.

[7] Voronov S.A., Veidun M. Mathematical modeling of the cylindrical grinding process. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 4, pp. 394–403. https://doi.org/10.3103/S1052618817030177

[8] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Саразов А.В., Сукочева Е.А. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 6(675), с. 73–81.

[9] Тышкевич В.Н., Носенко В.А., Саразов А.В., Орлов С.В. Выбор оптимальных условий плоского шлифования направляющих линейных подшипников малой жесткости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 7(736), с. 30–39.

[10] Солер Я.И., Май Динь Ши Повышение эффективности использования карбидкремниевых абразивных кругов при плоском шлифовании титанового сплава ВТ20. *Вестник ИрГТУ*, 2016, № 8(115), с. 1–13.

[11] Кащук В.А., Верещагин А.Б. *Справочник шлифовщика*. Москва, Машиностроение, 1988, 480 с.

Comparative analysis of surface roughness and technological time during flat and round grinding of workpieces from various materials

Novgorodova Maria Vasilievna novgmary@gmail.com
Babinov Artyom Evstafievich babinov0777@gmail.com
Kalmykov Vadim Vladimirovich vadim@kalmykovs.ru
SPIN-code: 1161-2902

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The surface roughness of various materials, such as 45 structural steel, U8A tool steel, R6M2, TC5 titanium alloy, after two types of grinding: external round and flat peripheral. The calculated and actual grinding time was also investigated. The results of experimental studies on grinding machines with fixing of cutting modes and surface roughness measurement are presented. Round grinding is shown to provide 10-15% less roughness for titanium alloy, but it is characterized by a large variation of values. It is concluded that the obtained data can be used for optimization of grinding modes. Practical recommendations for production conditions have been formulated.

Keywords: *grinding, round grinding, flat grinding, roughness, processing time*

УДК 621.792

Разработка технологической оснастки для клеевой сборки узла «вал — лопастное колесо» центробежного насоса в горизонтальной плоскости

Захарова Маргарита Эдуардовна vin.m@bmstu.ru
Гулидов Дмитрий Сергеевич dimka3845@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Разработана технологическая оснастка для формирования клеевого соединения вала и лопастного колеса центробежного насоса в горизонтальной плоскости, направленная на повышение технологичности и дальнейшую автоматизацию процесса сборки. Обоснована целесообразность горизонтального расположения деталей, обеспечивающего повышение точности базирования, улучшение повторяемости процесса и исключение вытекания клея, характерного для вертикальной компоновки. Показано, что применение разработанной оснастки упрощает процесс сборки, снижает трудоемкость, повышает качество соединения и создает предпосылки для внедрения на автоматизированных производственных линиях серийного машиностроения.

Ключевые слова: *клеевое соединение, технологическая оснастка, автоматизация сборки, центробежный насосный агрегат, лопастное колесо, точность позиционирования*

Современное машиностроение выдвигает повышенные требования к качеству и повторяемости сборочных соединений. Поиск направлен на решения, которые одновременно повышают технологичность, снижают трудоемкость и учитывают возможность автоматизации. На этом фоне клеевые соединения рассматриваются как альтернатива традиционным шпоночным соединениям и посадкам с натягом: они совместимы с разнородными материалами, распределяют нагрузки более равномерно, снижают массу и исключают риски электрохимической и фреттинг-коррозии. Технологии склеивания давно применяются в авиа-, авто-, судостроении, энергетике и все активнее внедряются в насосные агрегаты, где доминировали классические методы сборки.

Главная задача при применении клеев — обеспечить стабильность процесса для получения высокого качества соединения. Для этого необходима технологическая оснастка, которая будет обеспечивать точность позиционирования деталей при клеевой сборке, а в дальнейшем — позволит применить ее в автоматизированном участке [1].

Ранее изучались вертикальные схемы склеивания с регулируемым зазором, они эффективны по качеству, но практически не применимы в автоматизации [2, 3]. Настоящая работа предлагает альтернативу — горизонтальную компоновку с оснасткой для склеивания лопастного колеса (крыльчатки) и вала насоса. Такой подход снимает ограничения вертикального способа и улучшает интегрируемость в роботизированные ячейки.

Преимущества горизонтального метода:

– точность и простота. В горизонтальном положении проще обеспечить жесткое базирование без сложных удерживающих механизмов, снижается вероятность смещения деталей;

– возможность автоматизации. Оснастка позволяет реализовать цикл сборки с минимальным участием оператора, повышая производительность и повторяемость процесса сборки.

Объектом исследования является насосный агрегат, в узле которго осуществляется склеивание лопастного колеса с валом (рис. 1). В качестве баз:

– для крыльчатки — наружная цилиндрическая поверхность;

– для вала — центровые отверстия вала.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Представленная компоновка приспособления для сборки обеспечивает надежное и точное позиционирование. Анализ схемы базирования определил набор функциональных узлов.

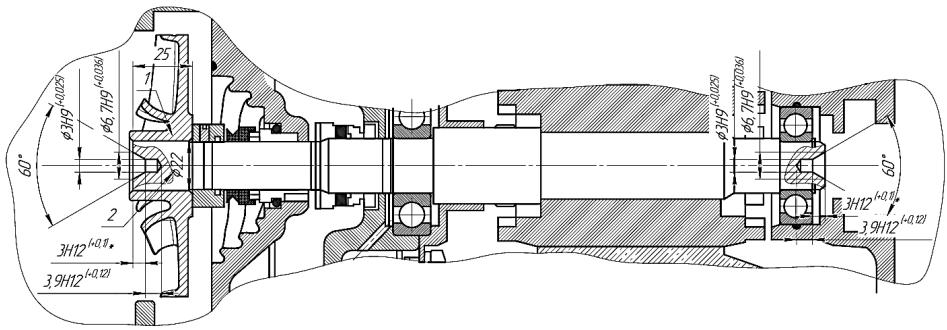


Рис. 1. Фрагмент чертежа узла в момент склеивания лопастного колеса и вала:
1 — лопастное колесо; *2* — вал

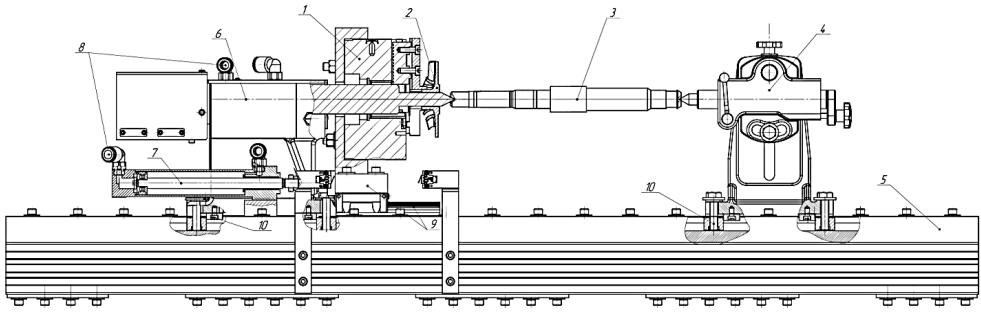


Рис. 2. Общая компоновка разработанного приспособления:
1 — трехкулачковый патрон; *2* — лопастное колесо; *3* — вал устанавливаемого в центра насоса; *4* — регулируемый механический центр; *5* — основная плита приспособления; *6* — пневматический центр; *7* — пневмоцилиндр для движения трехкулачкового патрона; *8* — фитинги для подключения пневматики; *9* — рельсовые направляющие и каретки; *10* — установочные элементы

Центры для вала. Один центр — жесткий пневматический (рис. 2, *6*), облегчает ввод/съем детали и обеспечивает стабильно воспроизводимый прижим, второй — жесткий регулируемый (рис. 2, *4*), для обеспечения соосности и компенсации отклонений.

Патрон для крыльчатки. Выбран трехкулачковый патрон с расточенными кулачками из фторопласта (PTFE), для исключения повреждений базовой поверхности при зажиме. Конструкция патрона имеет сквозное отверстие для прохода пиноли пневмоцентра (рис. 2, *1*) [4].

Направляющие. Патрон смонтирован на линейных рельсовых направляющих с каретками. Перемещение передается от пневмоцилиндра, что позволяет вести крыльчатку по оси к упору на торце вала без сложных ограничителей (рис. 2, *9*) [5, 6].

Основание. Плита с Т-пазами/пазами под крепление центров и обработанными установочными поверхностями/отверстиями под направляющие и т. д. (рис. 2, *5*).

В начале работы осуществляется предустановка крыльчатки. Деталь центрируется и зажимается в кулачках патрона. Вал вводится в неподвижный (регулируемый) центр и поджимается подвижным.

Пневмоцилиндр перемещает патрон с крыльчаткой по направляющим до упора в торец вала. Усилие прижима настраивается регулировкой давления в пневмоцилиндре, что предотвращает перегрузку и повреждение кромок сопряжения.

Представленная конструкция обеспечивает малый контролируемый зазор δ=0,1–0,2 мм, что благоприятно для адгезии. Равномерность толщины слоя достигается сочетанием точного базирования и осевого прижима с ограниченным усилием.

В качестве клеевого состава применяется состав «УНИГЕРМ 7» [1] с временем ручного отверждения $t = 10–20$ мин и достижением прочности на сдвиг $\tau_{B2} = 7{,}5$ Мпа. После набора требуемых характеристик производится разжим патрона, возврат узлов в исходное положение и съем узла.

Предложенная конструкция оснастки для склеивания лопастного колеса и вала насоса в горизонтальной плоскости позволяет упростить технологический процесс, повысить точность соединения и в дальнейшем автоматизировать технологический процесс сборки рассматриваемых узлов.

Реализация механизированного патрона и пневмоцилиндра делает процесс сборки более стабильным и повторяемым, что особенно важно для серийного производства. Таким образом, применение данного метода может существенно повысить качество соединений, сократить трудоемкость и снизить себестоимость изготовления изделия, что делает его перспективным для внедрения в промышленность [1–6].

Список источников

[1] Захарова М.Э., Гулидов Д.С. Разработка технологического процесса сборки вала и лопастного колеса с применением клеевых составов. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2024, № 11, с. 483–489.

[2] Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Инновационный метод сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 6, с. 250–256.

[3] Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Оригинальная технология сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 8, с. 348–351.

[4] *SCHUNK GmbH & Co. KG*. URL: https://schunk.com/de/en (accessed 22.02.2025).

[5] *CNC-Технологии.* URL: https://cnc-tehnologi.ru/ (дата обращения 22.02.2025).

[6] *PEMAKS. Пневмоцилиндры.* URL: https://www.pemaks.ru/catalog/pnevmotsilindry/ (дата обращения 22.02.2025).

Development of horizontal fixturing for the adhesive assembly of a centrifugal pump shaft–impeller joint

Zakharova Margarita Eduardovna vin.m@bmstu.ru
Gulidov Dmitriy Sergeevich dimka3845@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The technological tooling has been developed for forming an adhesive joint between the shaft and the impeller of a centrifugal pump in a horizontal plane, aimed at improving the processability and further automation of the assembly process. The expediency of the horizontal arrangement of the parts has been substantiated, which ensures increased accuracy of alignment, improved repeatability of the process, and eliminates the leakage of adhesive that is typical for vertical arrangements. It has been shown that the use of the developed tooling simplifies the assembly process, reduces labor costs, improves the quality of the joint, and creates the preconditions for its implementation on automated production lines in serial mechanical engineering.

Keywords: *adhesive joint, assembly fixture, automation, positioning accuracy, centrifugal pump, shaft-impeller bonding*

УДК 621.98

Методы обработки материалов давлением с локальным очагом пластической деформации для изготовления корпусных деталей

Дикарев Даниил Сергеевич dikaryovds@student.bmstu.ru
Малышев Александр Николаевич malyshev.an@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы обработки металлов давлением с локальным очагом деформации: инкрементальная листовая формовка, вальцовка и ротационная вытяжка, их технологические преимущества, перечислены области их применения для изготовления корпусных деталей. Подчеркнута необходимость повышения гибкости производственных процессов в условиях современного машиностроения, особенно при мелкосерийном производстве и прототипировании. Проанализированы технологические особенности каждого метода, их преимущества и области применения с целью сокращения времени подготовки производства и снижения затрат на изготовление оснастки.

Ключевые слова: *локальный очаг деформации, инкрементальная формовка, ротационная вытяжка, вальцовка, корпусные детали*

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к гибкости производственных процессов в случаях, когда возникает потребность в быстром и экономически эффективном изготовлении корпусных деталей сложной формы в условиях мелкосерийного производства и прототипирования. Традиционные методы листовой штамповки в таких случаях часто нерентабельны из-за высокой стоимости и длительных сроков изготовления штамповой оснастки. Решением данной проблемы является внедрение технологий обработки давлением с локальным очагом деформации, которые позволяют значительно снизить трудоемкость и стоимость подготовки производства [1].

К таким методам относятся инкрементальная листовая формовка, вальцовка и ротационная вытяжка. Их объединяет принцип воздействия на материал: пластическая деформация происходит не по всей поверхности заготовки одновременно, а в ограниченной зоне, которая перемещается по обрабатываемой поверхности, формируя конечную геометрию изделия. Это приводит к значительному снижению деформирующих усилий, позволяет использовать стандартное оборудование с ЧПУ (например, фрезерные станки) и исключает необходимость в сложной и дорогостоящей оснастке [2].

Инкрементальная листовая формовка является одним из наиболее гибких методов. Процесс заключается в послойном формировании детали с помощью небольшого инструмента сферической формы, который перемещается по траектории, заданной системой ЧПУ. Основными преимуществами являются: возможность изготовления деталей практически любой формы непосредственно из CAD-модели, высокая степень формоизменения и минималь-

ные затраты на оснастку [3, 4]. Исследования показывают, что способность материала к деформации материалов значительно выше, чем при традиционных процессах, что объясняется особым напряженно-деформированным состоянием в локальной зоне контакта [5]. К недостаткам можно отнести относительно невысокую производительность и необходимость точного управления инструментом для обеспечения требуемой точности и качества поверхности. Области применения включают быстрое прототипирование, изготовление деталей автомобильных кузовов, авиационных компонентов и медицинских имплантатов [1].

Вальцовка широко применяется для изготовления цилиндрических и конических обечаек. Процесс заключается в пластической деформации листовой заготовки путем ее непрерывного пропускания между вращающимися валками. Кривизна получаемой детали регулируется положением верхнего нажимного валка относительно нижних опорных. Ключевой задачей является определение оптимальных режимов обработки, включая усилие, скорость подачи и положение валков, для достижения заданной геометрии и минимизации таких дефектов, как упругое пружинение [6]. Современные подходы используют конечно-элементное моделирование для анализа напряженно-деформированного состояния и прогнозирования остаточной кривизны детали после разгрузки, что позволяет существенно сократить количество дорогостоящих наладочных экспериментов [7]. Для интенсификации процесса и улучшения качества поверхности могут применяться валки, вращающиеся с разной окружной скоростью, что обеспечивает продольный сдвиг слоев металла [8].

Ротационная вытяжка — высокоэффективный метод изготовления осесимметричных тонкостенных деталей (полуфабрикатов типа днищ, кожухов, сопел). Процесс может осуществляться на токарных станках с ЧПУ или специальных ротационных машинах, где заготовка закрепляется на вращающемся шпинделе. Деформирующий инструмент оказывает локальное давление на заготовку, постепенно формируя ее контур. Основными преимуществами ротационной вытяжки являются: высокое качество поверхности, возможность точного контроля толщины стенки и возможность обработки труднодеформируемых материалов, включая титановые сплавы. Этот метод характеризуется высокой производительностью при изготовлении деталей типа тел вращения и широко используется в аэрокосмической и оборонной промышленности.

Анализ рассмотренных методов показывает, что выбор конкретной технологии зависит от геометрии детали, серийности производства и предъявляемых требований к точности и качеству поверхности. Инкрементальная формовка наиболее универсальна для сложных асимметричных деталей и единичного производства. Вальцовка является оптимальным решением для создания цилиндрических и конических обечаек большого диаметра. Ротационная вытяжка незаменима для высокопроизводительного изготовления точных осесимметричных деталей.

Таким образом, методы обработки материалов давлением с локальным очагом деформации позволяют значительно сократить время и стоимость подготовки производства, оперативно реагировать на меняющиеся потребности рынка и осваивать выпуск сложных изделий в условиях мелкосерийности и прототипирования.

Список источников

[1] Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 11(656), с. 84–88.

[2] Tisza M. General overview of sheet incremental forming. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2012, vol. 55, no. 1, pp. 113–120.

[3] Gatea S., Ou H., McCartney G. Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, pp. 479–499. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8426-6

[4] Leszak E. *Apparatus and process for incremental dieless forming.* US Patent US3342051A1, 1967.

[5] Martins P.A.F., Bay N., Skjocdt M., Silva M.B. Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57, no. 1, pp. 247–252.

[6] Бурмистров Н.В., Каут А.М., Кудаев С.П., Сысуев П.С., Федоров В.А., Фоминов А.Г., Чугунов М.В. Определение оптимальных режимов обработки для вальцовки обечаек. *Вестник машиностроения*, 1999, № 3, с. 125–129.

[7] Лысов М.И. *Теория и расчет процессов изготовления деталей методом гики.* Москва, Машиностроение, 1966, 236 с.

[8] Мошконов В.В. *Вальцы.* Патент № 2116860 С1 РФ, 1998, 5 с.

Methods of surface plastic deformation with a local deformation zone for the manufacture of body parts

Dikarev Daniil Sergeevich dikaryovds@student.bmstu.ru
Malyshev Aleksandr Nikolaevich malyshev.an@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

Methods of metal pressure treatment with a local deformation focus are considered: incremental sheet forming, rolling and rotary drawing, their technological advantages, and the areas of their application for the manufacture of body parts are listed. The need to increase the flexibility of production processes in modern machine building is emphasized, especially in small-scale production and prototyping. The paper analyzes in detail the technological features of each method, their advantages and applications in order to reduce the preproduction time and reduce the cost of manufacturing tooling.

Keywords: *surface plastic deformation, local deformation zone, incremental forming, rotary drawing, rolling, body parts*

Секция 2. Технологии и машины сварочного производства

УДК 621.791

Способы повышения сопротивления гидроабразивному износу деталей машин, полученных наплавкой

Орлик Антон Геннадьевич a.g.orlik@yandex.ru
Орлик Геннадий Владимирович G.V.Orlik@yandex.ru
Манзюк Андрей Иванович andrey.manzuuk@gmail.com

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены различные способы повышения износостойкости деталей машин в условиях гидроабразивного износа путем наплавки. Произведен анализ таких способов, как механизированная дуговая наплавка в среде защитного газа и ручная дуговая наплавка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитного газа аргона, и сделан вывод о рациональности использования смеси газов, применения материалов в виде шихты и материалов армирующая фаза которых формируется во время кристаллизации. Также сделан вывод о том, какое из защитных покрытий наиболее устойчивы к износу: TeroCote 7888T, Diamax M или релит ЛЗ-11-7.

Ключевые слова: *порошковые материалы, износостойкость, восстановительная наплавка, легирование, гидроабразивный износ, восстановление поверхностей, долговечность*

Практика эксплуатации машин и агрегатов показывает, что потеря работоспособности происходит не из-за разовых механических поломок, а постепенным износом рабочих поверхностей, приводящих детали к отказу. Изнашиванию подвержены детали любого оборудования, поэтому повышение их износостойкости с целью обеспечения наибольшей долговечности является одной из важнейших задач современного машиностроения.

Для повышения долговечности применяют различные технологические приемы и материалы, влияющие на формирование поверхностного слоя с заданными свойствами. Одним из наиболее эффективных способов является наплавка износостойкого материала — контролируемое нанесение расплавленного металла на заранее подготовленную поверхность металла с последующей кристаллизацией, в результате чего получается упрочненный слой заданной толщины и геометрии. В качестве наплавочного материала выбраны специальные присадочные ленты, проволоки и порошковые композиции, позволяющие обеспечить повышенную долговечность при различных механизмах изнашивания: адгезионном, гидроабразивном, абразивном и других. Анализ современных статей и нормативных документов показывает, что эта область является высоко исследуемой: описаны различные варианты дуговой, плазменной, лазерной наплавки, а также оптимальные режимы и составы материалов, позволяющих значительно повысить износостойкость деталей машин.

Повышение гидроабразивного износа путем механизированной дуговой наплавки приводится в работе А.Г. Орлика и Г.Г. Чернышова [1], где они

рассматривают применение материалов с армирующими фазами, которые вводятся в виде шихты (в готовом виде) и материалы, в которых армирующая фаза формируется в процессе кристаллизации.

Авторы ставят перед собой цель — повысить эксплуатационные свойства шнека, работающего в условиях гидроабразивного изнашивания с помощью изменения состава газа, а именно 80 % Ar + 20 % CO_2 и 98 % Ar + 2 % CO_2 [2], а также применения высокомодульной армирующей фазы вводящейся в виде шихты (в нее такие компоненты, как Mn, Fe, Si) и материалов высокопрочной армирующей фазы, которая формируется в процессе кристаллизации за счет легирования таких элементов, как: Mo, W, Nb, B, Mo [3]. Материалом первого выбрана порошковая проволока DO*48, а второго DO390N. На основании проведенных исследований выяснилось, что применение газа, содержащего 2 % CO_2 эффективнее применения 20 % CO_2 [2], так как при использовании 20 % CO_2 наблюдалось выгорание легирующих элементов и повышенное перемешивание наплавленного и основного металлов. При наплавке проволокой, которая обеспечивает формирование армирующей фазы в процессе кристаллизации, твердость поверхности наплавленного слоя составляет 58–67 HRC и твердость по глубине почти не меняется, а при применении шихты, твердость у поверхности ниже, чем у линии сплавления. По сравнению с изначальной технологией наплавки реборды шнека (использовались электроды Т-590, твердость составляла 51 HRC), удалось увеличить износостойкость детали в 2 раза и повысить твердость поверхности на 7–16 HRC.

В работе Б.В. Стефанива [4] также описаны пути повышения гидроабразивного износа наплавкой.

Она посвящена сравнительному исследованию износостойкости наплавленных защитных покрытий при гидроабразивном изнашивании для продления ресурса корпусов буровых долот. Автор испытывал три присадочных материала с карбидами вольфрама, наплавленных на сталь 45: на Ni-основе TeroCote 7888T (частицы WC «split»), Fe-основе Diamax M (дробленый WC) и релит ЛЗ-11-7 (сферические гранулы WC). Наплавку выполняли ручной дуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом с защитным газом аргоном; образцы 20×16×6 мм с толщиной наплавленного слоя около 3 мм испытывали на установке в потоке абразива (кварцевое стекло 0,05–0,50 мм) при удельной нагрузке 0,5 МПа, скорости 0,58 м/с и длинах трения 250 и 1250 м; критерий — потеря массы. Несмотря на более высокую твердость Fe-основ (57–59 HRC для Diamax M и 58–59 HRC для ЛЗ-11-7 против 48 HRC у TeroCote 7888T), наибольшая стойкость оказалась у защитного покрытия TeroCote 7888T. При комнатной температуре его износостойкость в 1,5 раза больше, чем у ЛЗ-11-7, и в 2 раза больше, чем у Diamax M. Автор отмечает селективный характер изнашивания композитов и «эффект затенения» — поочередное разрушение матрицы с оголением частиц WC, это снижает зависимость стойкости от твердости матрицы. Исходя из проведенного анализа, для восстановления и защиты рабочих зон долот в условиях гидроабразивного износа наиболее оптимально использовать Ni-композит TeroCote 7888T.

Схожий подход — включение жестких частиц в металлическую матрицу для повышения абразионной стойкости — был предложен и патентован (патент US6811898B2) в области абразионно-стойких покрытий [5].

Таким образом наплавка — эффективный и технологически отработанный способ повышения срока службы деталей, работающих при гидроабразивном и абразивном изнашивании.

Для повышения долговечности деталей, работающих в гидроабразивной среде, рекомендуется использовать защитный газ с наименьшим содержанием углерода, использовать материалы с высокопрочной армирующей фазой, формирующейся в процессе кристаллизации, а также использовать композитные материалы на Ni-основе, т. к. они обеспечивают пониженную потерю массы, а, следовательно, повышенную износостойкость.

Список источников

[1] Орлик А.Г. *Разработка технологии механизированной дуговой наплавки покрытия с заданным комплексом свойств, стойкого к гидроабразивному износу*. Автореф. дис. … канд. техн. наук. Москва, 2012, 16 с.

[2] Сорокин С.П., Орлик Г.В., Орлик А.Г., Коберник Н.В., Галиновский А.Л., Михеев Р.С. Влияние защитного газа на структуру и свойства стойких против абразивного износа покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2018, т. 14, № 11, с. 500–504.

[3] Пломодьяло Р.Л., Штоколов С.С. *Состав самозащитной порошковой проволоки для износостойкой наплавки.* Патент № 2645828 C2 РФ, 2018, бюл. № 7, 6 с.

[4] Стефанив Б.В. Исследование износостойкости защитных покрытий в условиях гидроабразивного изнашивания. *Автоматическая сварка*, 2016, № 9(756), с. 29–32. https://doi.org/10.15407/as2016.09.05

[5] Ohara M., Mega M. *Wear-resistant coating and method for applying it.* Patent № 6,811,898 B2, USA, 2002.

Methods of increasing the resistance to waterjet wear of machine parts obtained by surfacing

Orlik Anton Gennadievich a.g.orlik@yandex.ru
Orlik Gennady Vladimirovich G.V.Orlik@yandex.ru
Manzyuk Andrey Ivanovich andrey.manzuuk@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper considers various ways to increase the wear resistance of machine parts under conditions of waterjet wear by surfacing. An analysis of such methods as mechanized arc welding in a protective gas environment and manual arc welding with a non-melting tungsten electrode in an argon protective gas environment was performed, and a conclusion was made about the rationality of using a mixture of gases, using materials in the form of a charge and materials whose reinforcing phase is formed during crystallization. It is also concluded which of the protective coatings are most resistant to wear: TeroCote 7888T, Diamax M or relit LZ-11-7.

Keywords: *powder materials, wear resistance, restorative surfacing, alloying, waterjet wear, surface restoration, durability*

Секция 3. Физика конденсированного состояния и электронная техника

УДК 621.383

Компенсация фоновой засветки фотодиодов

Андреев Дмитрий Владимирович dmitrii_andreev@bmstu.ru
Цирульников Илья Юрьевич tsirulnikoviyu@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Объектом исследования является схема компенсации фоновой засветки фотодиодов постоянным излучением, построенная на основе операционного усилителя, включенного по схеме интегратора. Рассмотрены особенности функционирования предложенной схемы и представлены формулы для предварительных расчетов ее параметров. Путем схемотехнического моделирования в системе автоматического проектирования NI Multisim 12.0 проведено исследование работы схемы для разной величины смещения входного импульсного сигнала по постоянному току. Показаны результаты моделирования переходных процессов для разных входных воздействий.

Ключевые слова: *фотоприемное устройство, фоновая засветка, NI Multisim, схемотехническое моделирование*

Разработка фотоприемных устройств (ФПУ) сопряжена со множеством сложностей, обусловленных неопределенностью параметров входных сигналов. Для обеспечения надежной работы проектируемого ФПУ при сохранении малых габаритных размеров, низкого уровня шумов и энергопотребления предпочтение отдается схемам для регистрации импульсных сигналов [1].

С целью повышения точности в паре с ФПУ в роли излучателей часто используются полупроводниковые лазерные диоды, формирующие импульсы с малой длительностью и высокой оптической мощностью. Чем больше мощность и короче фронт, тем выше дальность и точность обнаружения объекта, от которого импульс отражается. Это требует использование быстродействующих фотодиодов (ФД) с высокой токовой чувствительностью, например ФД со структурой *p*-*i*-*n* или лавинных ФД.

Чувствительность ФД определяется в том числе и площадью фоточувствительного элемента (ФЧЭ). Чем она больше, тем лучше обнаружительная способность, что также означает повышенную чувствительность к фоновой засветке, усложняющей прием и обработку сигнала. При наличии засветки ФД генерирует постоянный ток, смещающий переменный сигнал. Чем интенсивнее засветка, тем больше смещение, что может привести к переходу схемы обработки сигнала в режим насыщения [2].

Частично проблему можно решить конструктивными способами, ограничив плоский угол зрения ФД или применив оптический фильтр. Однако ограничение угла зрения приводит к уменьшению чувствительности, а фильтр ослабляет лишь часть спектра фонового излучения из-за необходимости пропускать длину волны излучателя.

Схемотехнические методы не требуют изменений оптической схемы, что повышает их доступность. Одним из простейших способов является последовательное включение конденсатора, между ФД и схемой обработки. Величина его емкости C будет определяться согласно формуле (1) и зависеть от минимальной частоты принимаемого сигнала f и суммы сопротивлений нагрузки фотодиода R_H и входного сопротивления последующей схемы R_{BX}. Обычно рекомендуется выбирать конденсатор, сопротивление которого на минимальной рабочей частоте будет в несколько раз меньше $R_{\text{Н}} + R_{\text{ВХ}}$:

$$C >> \frac{1}{2\pi f (R_{\text{Н}} + R_{\text{ВХ}})}. \quad (1)$$

Чем ниже f, тем выше требуемое значение C, что в области низких частот может привести к увеличению массы и размеров конденсатора, повышению длительности переходных процессов, токов утечки, шумов, чувствительности к электромагнитным воздействиям и т. д. Чем больше $R_{\text{Н}} + R_{\text{ВХ}}$, тем меньше требуемое значение C, что области высоких частот может потребовать емкость по величине, сравнимую с паразитными емкостями печатной платы.

Альтернативой может быть схема, предложенная на рис. 1.

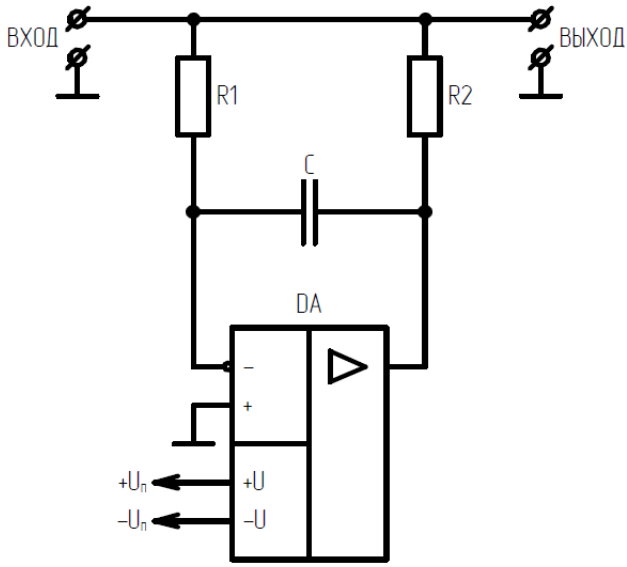


Рис. 1. Схема компенсации фоновой засветки фотодиода на основе интегратора

Здесь операционный усилитель (ОУ) включен по схеме интегратора, постоянная времени τ которого определяется согласно формуле (2):

$$\tau = R_2 C. \tag{2}$$

Величину τ следует выбирать такой, чтобы конденсатор C успевал разряжаться до момента подачи на вход следующего импульса и схема не искажала сигнал с ФД. За счет регулировки τ возможно настроить схему так, чтобы она выступала в роли первичного частотного фильтра входного сигнала [3–5].

Эквивалентное сопротивление $R_1 \| R_2$ определяет коэффициент преобразования фототока $I_Ф$ в напряжение $U_Ф$ согласно формуле (3):

$$U_\Phi = R_1 \| R_2 \, I_\Phi = \frac{R_1 R_2 I_\Phi}{R_1 + R_2}. \tag{3}$$

Принцип работы схемы заключается в следующем. Неинвертирующий вход ОУ подключен к общему проводу, стабилизируя выходной сигнал на уровне, равном напряжению смещению нуля ОУ U_0. Если на вход поступает постоянная составляющая, конденсатор C блокирует ее прохождение. Ток на инвертирующем входе стремится к нулю, как и падение напряжения на R_1, следовательно сигнал на инвертирующий вход не поступает и схема блокирует постоянную составляющую, пропуская переменную. Уровень выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ по постоянному току в случае необходимости его регулировки может быть изменен подачей напряжения смещения U на неинвертирующий вход, и определен в соответствии с формулой (4):

$$U_{\text{ВЫХ}} = U + U_0. \tag{4}$$

Для проверки работы схемы в САПР NI Multisim 12.0 было создано две виртуальных модели, представленные на рис. 2 [6].

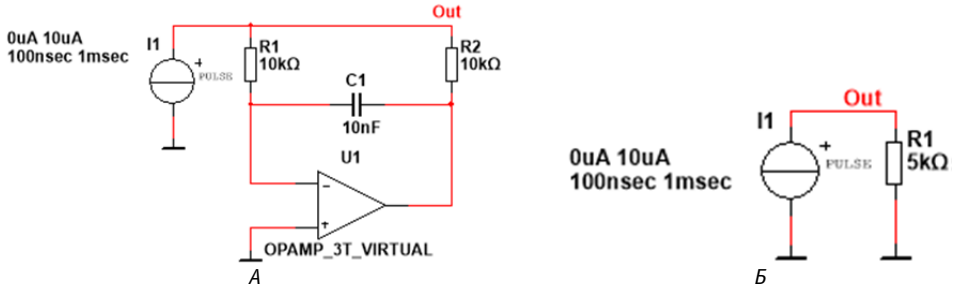


Рис. 2. Модели электрических схем, построенных в NI Multisim 12.0

Модель *А* построена согласно схеме, изображенной на рис. 1. В качестве ОУ выбран идеальный ОУ с питающими напряжениями ± 12 В, взятый из встроенной библиотеки программы без внесения изменений. ФД представлен идеальным источником импульсного тока I1 с амплитудой токового им-

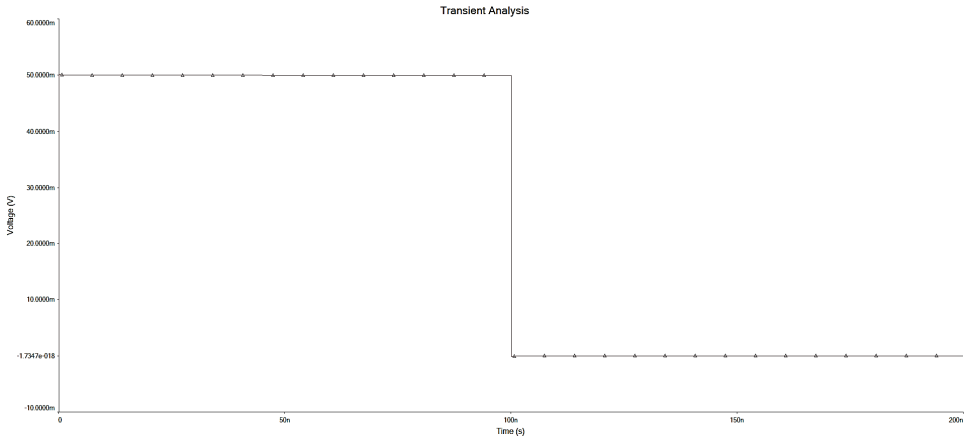
пульса 10 мкА, длительностью 100 нс и периодом 1 мс. Номиналы пассивных компонентов выбраны таким образом, чтобы период импульса превышал 5τ.

Модель *Б* представляет собой источник тока с нагрузочным резистором, сопротивление которого эквивалентно $R_1 \| R_2$, и предназначается для анализа результата работы модели *A*.

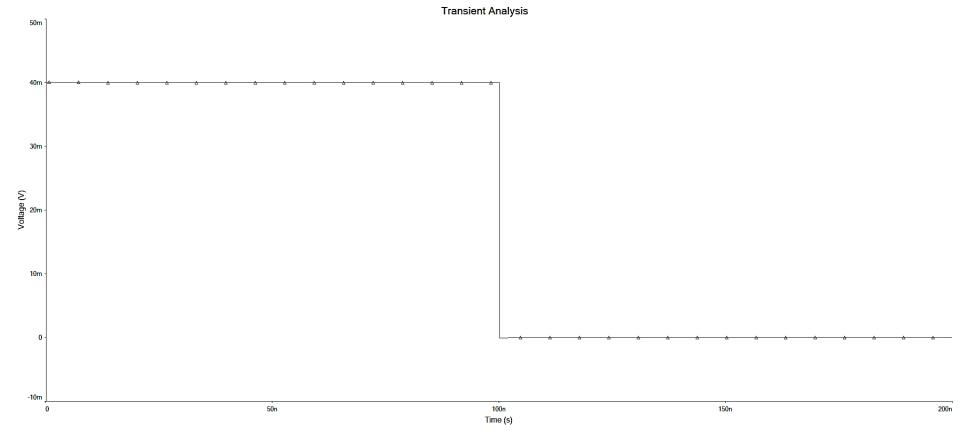
Для построенных схем были проведены моделирования переходных процессов для двух случаев:

– величина токового импульса 10 мкА, величина смещения импульса по постоянному току 0 мкА (рис. 3, *А*, рис. 4, *А*);

– величина токового импульса 10 мкА, величина смещения импульса по постоянному току 2 мкА (рис. 3, *Б*, рис. 4, *Б*).

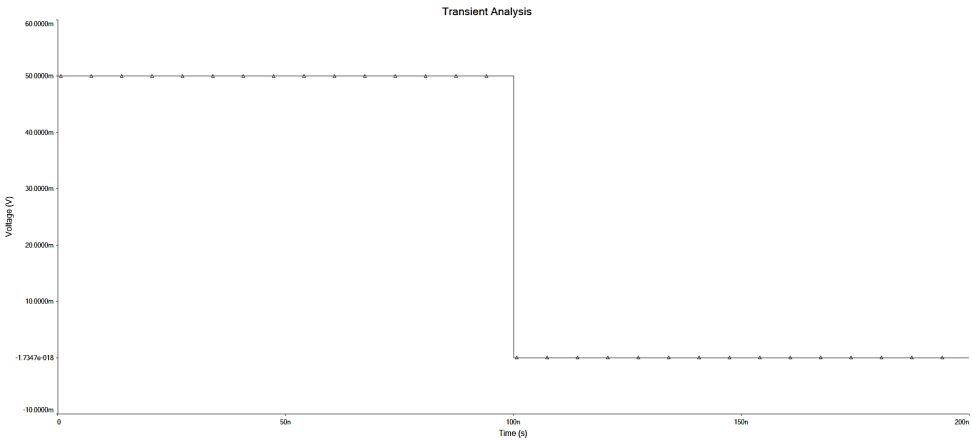


А

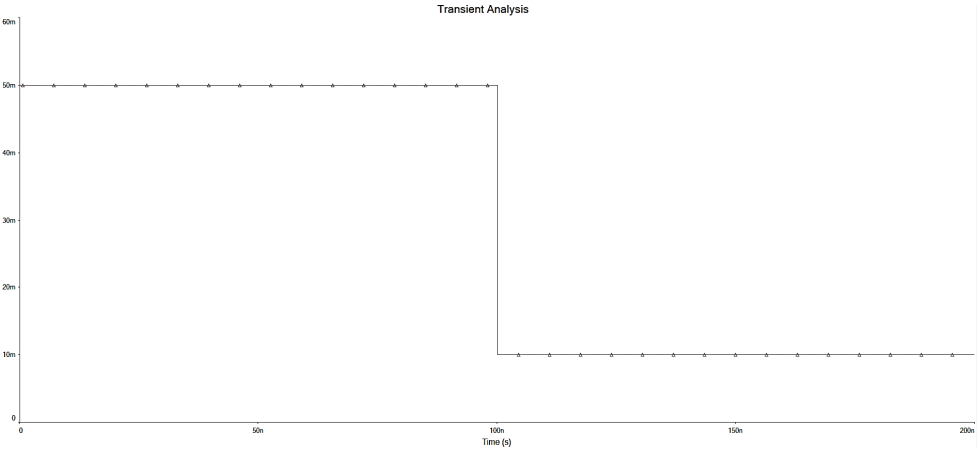


Б

Рис. 3. Результаты анализа модели А



А



Б

Рис. 4. Результаты анализа модели Б

Исходя из результатов моделирования переходных процессов, можно сделать вывод о том, что обе модели имеют одинаковый коэффициент передачи. Модель *А* заблокировала постоянную составляющую, сместившую сигнал модели *Б* на 10 мВ, что составляет 20 % от изначальной амплитуды, и не исказила форму выходного сигнала. Таким образом, предложенная схема может быть рассмотрена для решения задач по компенсации фоновой засветки фотодиодов при проектировке ФПУ.

В статье путем применения САПР NI Multisim 12.0 было проведено моделирование схемы для компенсации фоновой засветки фотодиодов. Полученные результаты могут быть применимы для практических и учебных целей.

Список источников

[1] Тришенков М.А. *Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов.* Москва, Радио и связь, 1992, 400 с.

[2] Мирошников М.М. *Теоретические основы оптико-электронных приборов*. Ленинград, Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977, 600 с.

[3] Волович Г.И. *Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств*. Москва, Издательский дом «Додэка-XXI», 2005, 528 с.

[4] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, art. no. 102(1-10). https://doi.org/10.3390/technologies12070102

[5] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection and irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 110, art. no. 012041(1-6). https://doi.org/10.1088/1757-899x/110/1/012041

[6] Разевиг В.Д. *Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0.* Москва, Солон-Р, 2003, 704 с.

Compensation of background light of photodiodes

Andreev Dmitry Vladimirovich dmitrii_andreev@bmstu.ru
Tsirulnikov Iliya Yurjevich tsirulnikoviyu@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This research considers the circuit for compensation of constant background light of photodiodes, which is based on an operational amplifier switched on as integrator. The features of the circuit are considered and formulas for preliminary calculations of its parameters are presented. A study of the circuit's output for input pulse signal with different bias was conducted using circuit simulation in the CAD system NI Multisim 12.0. The results of transient analysis for different input signals are shown.

Keywords: *photodetector, amplitude-frequency response, background light, NI Multisim, circuit simulation*

УДК 621.3.049.774

Влияние толщины фоторезиста и использования антирефлексных покрытий на качество проекционной фотолитографии

Перевозчикова Дарья Сергеевна perevozcikovadara10888@gmail.com
Кашин Виталий Валерьевич kashin@bmstu.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проанализированы особенности формирования топологического рельефа при проведении проекционной фотолитографии с использованием фоторезистов различной толщины. Рассмотрено влияние параметров слоя фоторезиста на качество совмещения масок и оптическое распознавание меток совмещения при проекционной фотолитографии. Исследована роль антирефлексных покрытий в снижении оптических эффектов. Определены способы улучшения читаемости меток совмещения и повышения точности формирования топологического рельефа.

Ключевые слова: *фотолитография, проекционная фотолитография, оптические эффекты, антирефлексные покрытия*

Качество топологическим рельефа один из самых важных параметров, который играет решающую роль в изготовлении интегральной микросхемы. Топологический рельеф воспроизводится на поверхности пластины путем проведения фотолитографических процессов, качество которых зависит от множества факторов: параметров экспонирования, характеристик оптической системы, а также от оптических свойств материалов и т. д. [1]. Основным инструментом для проведения фотолитографии является светочувствительный материал — фоторезист. Толщина слоя фоторезиста, профиль и качество его нанесения во многом определяют свойства топологического слоя. В особенности к параметрам слоя фоторезиста чувствительна проекционная фотолитография.

Для реализации проекционного совмещения используются специальные оптические метки, формируемые в объеме подложки и считываемые системой проекционного оборудования [2]. Одним из факторов, осложняющих процесс распознавания меток совмещения, является толщина фоторезиста, нанесенного на поверхность пластины перед экспонированием. Можно предположить, что тонкий слой фоторезиста улучшит оптическую распознаваемость метки совмещения, однако на практике тонкий слой оказывается очень чувствителен к рельефу подложки, из-за чего он не перекрывает полностью лунки знака совмещения и образует так называемые «лучи» на поверхности пластины, что значительным образом сказывается на оптической читаемости знака [1]. Кроме того, малый запас по толщине снижает стабильность фоторезиста при проведении процессов травления и делает его непригодным

в качестве маски при легировании. Но при этом чем тоще слой фоторезиста, тем сильнее свет ослабляется и рассеивается при прохождении к метке совмещения, чем уменьшает ее контрастность для системы совмещения [3]. Чрезмерное увеличение толщины фоторезиста приводим к ухудшению качества совмещения, а также сильно увеличивает время проведения процесса экспонирования. Однако при сильном уменьшении слоя фоторезиста проявляются интерференционные эффекты: многократные отражения на границах «воздух-фоторезист» и «фоторезист-подложка» вызывают стоячие волны, искажающие изображение метки и ухудшающие качество топологического рельефа. Стоячие волны возникают, когда падающий свет достигает подложки, часть его отражается обратно и снова проходит через фоторезист. Прямой и отраженный пучки накладываются друг на друга, образуя зоны усиления и ослабления интенсивности. В результате в толщине фоторезиста формируется периодическая структура освещенности: в максимумах светового поля экспонируется сильнее, в минимумах слабее. После проявления это приводит к неравномерному профилю — боковые стенки становятся «зазубренными», появляются пилообразные неровности и вертикальные колебания контура. Такая неравномерная экспозиция снижает точность переноса рисунка, ухудшает разрешение и приводит к тому, что одинаковые элементы проявляются по-разному при разных толщинах фоторезиста [4]. Кроме того, в области знаков совмещения стоячие волны могут маскировать реальные границы метки, снижая контраст и затрудняя корректное совмещение масок. Особенно сильно эффект может проявляться на слоях с высоким коэффициентом отражения таких как кремний или металл. Качество распознавания меток совмещения можно улучшить при помощи дополнительных фильтров, а снизить эффект от интерференции света можно используя антирефлексные покрытия [2].

Антирефлексные слои верхнего и нижнего типа, такие как TARC и BARC, по разному влияют на распределение света в толщине фоторезиста. TARC наносится поверх фоторезиста с целью уменьшения отражения на границе «воздух-фоторезист», он работает как просветляющий слой рассеивая или отражая свет на верхней границе, что снижает интерференцию и улучшает перенос рисунка. Одним из больших плюсов данного покрытия является то что оно водорастворимое или совместимое с проявителем [5]. Это означает что при проявлении фоторезиста оно смывается вместе с засвеченными участками фоторезиста. В отличии от TARC BARC не является водорастворимым и убирается отдельным этапом чаще всего плазменным травлением. BARC является нижним антирефлексным слоем, он располагается между фоторезистом и подложкой, что значительно уменьшает отражение на границе «фоторезист-подложка» [2]. Благодаря оптимальному показателю преломления и контролируемой толщине такой слой обеспечивает интерференционное подавление отраженного света, что улучшает воспроизводимость топологии и повышает точность совмещения, особенно при работе с сильно отражающими подложками. Дополнительный слой SiO_2 частично выполняет роль антирефлексного покрытия [6]. В отличие от BARC, оксид имеет меньшую по-

глощающую способность, но эффективно снижает общую отражательную способность подложки. Оксид кремния способен регулировать фазовые соотношения волн, что делает его естественным антирефлексным покрытием [7].

Выводы. Качество топологического рельефа и точность совмещения в процессах проекционной фотолитографии напрямую зависят от оптических свойств фоторезиста, его толщины и взаимодействия света на границах раздела сред. Оптимизация толщины фоторезиста способна снизить избыточное отражение и интерференционные эффекты, однако для достижениия результата этого не всегда достаточно. В таких случаях применяются антирефлексные покрытия, которые обеспечивают эффективное подавление отраженного излучения и выравнивание фазовых соотношений волн в оптической системе. Для достижения оптимального эффекта в технологическом процессе производства кристаллов микросхем рекомендуется использовать верхний или нижний антирефлексный слой на слоях с высоким коэффициентом отражения (кремнии, поликристаллическом кремнии, металле и т. д), в случаях, когда на пластине уже есть оксид кремния может быть достаточно его поглощающей способности.

Список источников

[1] Дроздов В.А. *Технология производства интегральных микросхем.* Москва, Радио и связь, 2001, 368 с.

[2] Колосов В.В., Кузнецов А.С. *Микроэлектроника: основы технологии и приборов.* Москва, Изд-во МИЭТ, 2012, 432 с.

[3] Ситников В.А. *Фотолитография в микро- и наноэлектронике.* Санкт-Петербург, Политехника, 2016, 284 с.

[4] Мельников В.И., Сидоров А.Н. *Фоторезисты и фотолитографические процессы.* Москва, Техносфера, 2014, 256 с.

[5] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки. *Микроэлектроника*, 2000, т. 29, № 2, с. 105–112.

[6] Андреев Д.В., Курносенко А.Е., Макарчук В.В., Соловьев В.А. *Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 467 с.

[7] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, art. no. 102(1-10). https://doi.org/10.3390/technologies12070102

The influence of photoresist thickness and the use of anti-reflective coatings on the quality of projection photolithography

Perevozchikova Darya Sergeevna perevozcikovadara10888@gmail.com
Kashin Vitaly Valerievich kashin@bmstu.ru
Andreev Vladimir Victorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The characteristics of topological relief formation during projection photolithography using photoresists of varying thicknesses are analyzed. The influence of photoresist layer parameters on mask alignment quality and optical recognition of alignment marks during projection photolithography is examined. The role of antireflective coatings in reducing optical effects is investigated. Methods for improving the readability of alignment marks and increasing the accuracy of topological relief formation are identified.

Keywords: *photolithography, projection photolithography, optical effects, anti-reflective coatings*

УДК 621.3.049.77

Влияние метода формирования подзатворного диэлектрика на качество и надежность КМОП микросхем

Радзышевская Виктория Витальевна vikuharad13@gmail.com
Кашин Виталий Валерьевич kashin@bmstu.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы формирования подзатворного диэлектрика в КМОП технологии изготовления кремниевых интегральных микросхем. Проанализирована зависимость параметров МОП транзисторов от способа получения и толщины подзатворного диэлектрика. Исследована возможность замены метода термического окисления поверхности кремния в сухом кислороде с сохранением необходимых параметров микросхемы КМОП транзистора с целью улучшения качества и надежности микросхемы. Даны рекомендации по выбору оптимального метода формирования подзатворного диэлектрика для обеспечения требуемого качества и надежности КМОП микросхем.

Ключевые слова: *подзатворный диэлектрик, оксид кремния, метод окисления, КМОП транзистор*

Подзатворный диэлектрик представляет собой тонкий слой, сформированный между затвором и каналом транзистора. Процесс окисления подзатворного диэлектрика это один из основных этапов формирования КМОП транзисторов, так как именно этот слой обеспечивает изоляцию затвора от канала транзистора, позволяя при этом управлять проводимостью канала через электрическое поле. Качество подзатворного диэлектрика во многом определяет характеристики и надежность КМОП микросхем [1–7].

Основными материалами подзатворного диэлектрика являются: оксид кремния, нитрид кремния, высокодиэлектрические диэлектрики, комбинированные и нанокомпозитные структуры. Чаще всего используют оксид кремния, так как он достаточно прост в получении, а также стабилен и устойчив к большинству химических реактивов, которыми могут далее обрабатывать поверхность [2].

Слой подзатворного диэлектрика может быть получен в результате проведения сухого, влажного или пирогенного окисления. Каждый из этих методов имеют свои преимущества и недостатки, которые напрямую связаны с надежность формируемой микросхемы КМОП транзистора [2–4].

При сухом окислении полупроводник подвергается воздействию кислорода при температуре 900–1100 °С, в результате чего на поверхности образуется слой оксида кремния. Данный метод позволяет создавать тонкие слои окисла с низкой концентрацией дефектов, но при этом скорость получения слоя ниже, чем во время влажного или пирогенного окисления. Используется в формировании тонких слоев в высокоточных устройствах [3].

В процессе влажного окисления полупроводник находится в среде кислорода и водяного пара при температуре около 900 °С. Образованный на поверхности, слой диэлектрика может получится с большим количеством дефектов, а также менее плотный, но отличается высокой скоростью роста на поверхности полупроводника, что позволяет быстро формировать толстый слой оксида кремния. Применяется для слоев, где основным критерием является толщина диэлектрика [3].

Пирогенное окисление представляет собой смесь сухого и влажного окисления, но при более высокой температуре 900–1200 °С. Принцип данного метода окисления заключается в том, что в результате воздействия высокой температуры взаимодействующие газы образуют на поверхности полупроводника чистый и плотный слой оксида кремния. Метод отличается высоким качеством диэлектрика и возможностью получения тонких слоев диэлектрика, но средней скоростью роста слоя диэлектрика. Применяется в случаях, когда необходимо соблюдение баланса между качеством и производительностью [3].

Выбор метода получения слоя подзатворного диэлектрика влияет на качество, толщину и параметры работы транзистора [1–7].

Полученная толщина слоя подзатворного диэлектрика влияет на напряжение пробоя полевого транзистора, токи утечки и надежность. Все эти параметры крайне важны при создании микросхемы КМОП транзистора [3–4, 6].

В ходе проведенного исследования были взяты две идентичные пластины микросхемы МОП транзистора, прошедшие по одинаковому технологическому маршруту до стадии окисления подзатворного диэлектрика.

На первой пластине слой подзатворного диэлектрика был получен методом окисления во влажной среде. При температуре среды 850 °С. На второй пластине слой оксида кремния был получен методом пирогенного окисления. При температуре среды 1000 °С. В обоих случаях толщину слоя окисла получили одинаковую.

В результате проведенной работы удалось сформировать такой слой подзатворного диэлектрика благодаря которому необходимые показатели полевого транзистора находились в допустимом диапазоне значений. Надежность и качество самого слоя оксида кремния увеличилось, а следовательно, и работоспособность микросхемы МОП транзистора улучшилась.

Выводы. В процессе производства КМОП микросхем определяющую роль играет выбранный метод получения подзатворного диэлектрика, так как в дальнейшем от него будут зависеть характеристики и надежность всей микросхемы.

Показано, что разными методами окисления подзатворного диэлектрика можно достичь одних и тех же заданных параметров МОП транзисторов, и при этом выбрав оптимальный метод улучшить качество и надежность микросхемы.

Список источников

[1] Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. *Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies.* Wiley-IEEE Press, 2009, 624 p.

[2] Palumbo F., Wen C., Lombardo S., Pazos S., Aguirre F., Eizenberg M., Hui F., Lanza M. A Review on Dielectric Breakdown in Thin Dielectrics: Silicon Dioxide, High-k, and Layered Dielectrics. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, vol. 29, art. no. 1900657(1-26).

[3] Глудкин О.П., Черняев В.Н. *Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА*. Москва, Радио и Связь, 1983, 296 с.

[4] Александров О.В., Мокрушина С.А. Модель поведения МОП-структур при радиационно-термических обработках. *Журнал технической физики*, 2024, т. 94, вып. 11, с. 1843–1847.

[5] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки. *Микроэлектроника*, 2000, т. 29, № 2, с. 105–112.

[6] Андреев В.В. Плазменная и инжекционная модификация электрофизических характеристик МДП-структур. *Физика и химия обработки материалов*, 2001, № 6, с. 47–53.

[7] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, art. no. 102(1-10). https://doi.org/10.3390/technologies12070102

The impact of gate dielectric formation method on the quality and reliability of CMOS chips

Radzyshevskaya Victoria Vitalievna vikuharad13@gmail.com
Kashin Vitaly Valerievich kashin@bmstu.ru
Andreev Vladimir Victorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The methods of forming the gate dielectric in the CMOS technology of manufacturing silicon integrated circuits are considered. The dependence of the parameters of MOS transistors on the method of obtaining and the thickness of the gate dielectric is analyzed. The possibility of replacing the method of thermal oxidation of the silicon surface in dry oxygen while maintaining the necessary parameters of the CMOS transistor chip in order to improve the quality and reliability of the chip is investigated. Recommendations are given on choosing the optimal method of forming the gate dielectric to ensure the required quality and reliability of CMOS chips.

Keywords: *gate dielectric, silicon oxide, oxidation method, CMOS transistor*

УДК 621.385.69

Проектирование СВЧ-устройств с учетом особенностей аддитивного производства

Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Полпудников Сергей Викторович polpud@bmstu.ru
Алехин Артем Владимирович alyokhinav@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема возможного несовпадения расчетных и экспериментальных характеристик СВЧ-устройств, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. Предложен упрощенный метод сквозного проектирования, который предусматривает учет технологических погрешностей 3D-печати на этапе моделирования. Рассмотрен цикл корректировки 3D-модели, способный обеспечить минимальное расхождение между расчетными и экспериментальными характеристиками устройств.

Ключевые слова: *СВЧ-устройства, аддитивные технологии, 3D-печать, погрешности, моделирование, компенсация*

Введение. Развитие аддитивных технологий открывает новые возможности для проектирования и изготовления различных СВЧ-устройств, в частности фильтров. Использование подложек, изготовленных методом FDM-печати может значительно упростить процесс прототипирования и исследования свойств опытных образцов изделия [1, 2]. Однако присущая СВЧ-устройствам высокая чувствительность электродинамических характеристик к их геометрическим параметрам делает проблематичным оценку реальных свойств устройства по результатам его моделирования в симуляторах. Даже незначительные отклонения, возникающие при печати, могут вызывают заметное расхождение между расчетными и экспериментальными результатами.

Основная проблема заключается в том, что традиционно используемые этапы проектирования не учитывают влияние технологических искажений, таких как усадка, шероховатость и дискретизация поверхности. В результате изготовленные образцы требуют дополнительных подгонок и повторного изготовления.

Цель работы заключается в том, чтобы предложить методологию сквозного проектирования СВЧ-устройств, учитывающую технологические погрешности аддитивного производства еще на этапе виртуального моделирования.

Основные источники технологических погрешностей. В процессе аддитивного производства СВЧ-компонентов наблюдаются следующие типовые отклонения.

Шероховатость поверхности. Она обусловлена послойным способом формирования изделия. Каждый слой материала имеет определенную толщи-

ну, и при их наложении образуются неровности. Такие неровности увеличивают площадь эффективной поверхности и приводят к росту потерь на поверхностное сопротивление, что снижает добротность резонаторов и вызывает дополнительные затухания в волноводных и микрополосковых структурах [3].

Усадка материала. Во время полимеризации, спекания или охлаждения напечатанных образцов наблюдается изменение объема материала, что приводит в том числе к изменению геометрических размеров. Усадка может напрямую влиять на положение полосы пропускания фильтров и частоту настройки антенн.

Ступенчатость поверхности. Так как модель печатается послойно, а высота слоя конечна, то наблюдался тот же эффект, что и при цифровом преобразовании аналогового сигнала — погрешность дискретизации и квантования: гладкие наклонные поверхности компьютерной 3D-модели распечатывались ступенчато, что может приводить к локальным изменениям диэлектрической проницаемости.

Анализ влияния технологических погрешностей на характеристики СВЧ-устройств. Шероховатость вызывает увеличение эффективного пути распространения тока и рост поверхностных потерь. Согласно известным моделям, при увеличении параметра шероховатости *Ra* с 0,5 до 5 мкм добротность микрополоскового резонатора может снижаться на 10–15 %.

Кроме того, микронные неровности изменяют локальные условия граничных полей, что может вызывать неравномерность распределения плотности тока по проводящим элементам. Для тонкопленочных и высокочастотных структур это приводит к дополнительным потерям на частотах выше 10 ГГц.

Изменение линейных размеров модели вследствие усадки непосредственно отражается на резонансных свойствах устройства. Для простейшего прямоугольного резонатора относительное изменение частоты можно приближенно оценить выражением:

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx -\frac{\Delta L}{L_0},$$

где L_0 — номинальный размер; ΔL — изменение вследствие усадки.

Таким образом, при усадке 2 % резонансная частота сдвигается примерно на 2 %. Для микрополосковых фильтров и антенн это может составлять десятки мегагерц, что выходит за пределы допустимых технологических отклонений без предварительной компенсации.

Эффект «лесенки», возникающий при формировании наклонных поверхностей, изменяет эффективную диэлектрическую среду. Это приводит к дополнительной емкостной нагрузке и, как следствие, к смещению резонансных частот и ухудшению согласования.

Даже небольшие искажения геометрии (на уровне 50–100 мкм) способны изменить распределение поля и вызвать увеличение коэффициента отражения на 1–2 дБ в полосе пропускания.

Предварительное учетное моделирование технологических искажений позволяет заранее определить диапазон изменения характеристик при реальном изготовлении. На практике достаточно ввести в симулятор небольшие вариации размеров (±2–3 %), шероховатости или радиусов скруглений, чтобы оценить чувствительность устройства к каждому параметру [4, 5]. Это дает возможность определить допустимые технологические допуски и заранее скорректировать модель, минимизируя риск неприемлемых расхождений после печати.

Предлагаемая методология проектирования. Для компенсации указанных эффектов предлагается схема проектирования, включающая следующие этапы.

Идеальное моделирование. Создается базовая 3D-модель устройства, оптимизируются его СВЧ-характеристики в электромагнитном симуляторе (например, CST Studio или HFSS) [4].

Моделирование технологических искажений. Виртуально вносятся погрешности, характерные для выбранной технологии печати: увеличение шероховатости, уменьшение габаритов для предупреждения усадки, скругление острых кромок [3]. Деформации могут быть заданы средствами CAD-программ (Blender, Fusion 360).

Верификация. Искаженная модель повторно анализируется в электромагнитном симуляторе для оценки влияния технологических факторов на частотные характеристики.

Корректировка исходной модели. На основе результатов анализа исходная модель модифицируется с учетом компенсации выявленных отклонений. Например, при систематическом повышении резонансной частоты на 2 % исходная модель корректируется на понижение расчетной частоты.

Заключение. В работе предложена методология проектирования СВЧ-устройств, учитывающая типовые технологические погрешности аддитивного производства. Применение такого подхода позволяет сократить количество итераций прототипирования и повысить предсказуемость результатов изготовления.

В перспективе развитие методов автоматизированного учета технологических погрешностей возможно с использованием алгоритмов машинного обучения, которые смогут самостоятельно вносить корректировки в модель на основе накопленных статистических данных [1, 3].

Список источников

[1] Корнилов Д.Ю., Ткачев С.В., Зайцев Е.В., Ким В.П., Кушнир А.Е. Принтерные технологии в электронике. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2017, т. 9, № 2, с. 181–204.

[2] Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати. *Российский технологический журнал*, 2019, № 1, с. 80–102.

[3] Delmonte N., Silvestri L., Tomassoni C., Piekarz I., Sorocki J., Perregrini L. Design and Manufacturing of Microwave Components by 3D Printing. *Microwave Mediterranean Symposium (MMS)*, 2022, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/MMS55062.2022.9825617

[4] *CST Studio Suite.* URL: https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite (accessed 21.10.2025).

[5] Подстригаев А.С. *Проектирование СВЧ-устройств. Ч. 1.* Санкт-Петербург, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, 120 с.

Design of microwave devices taking into account the specifics of additive manufacturing

Kuznetsov Vadim Vadimovich vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Polpudnikov Sergey Viktorovich polpud@bmstu.ru
Alyokhin Artyom Vladimirovich alyokhinav@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article examines the potential mismatch between the calculated and experimental characteristics of microwave devices manufactured using additive manufacturing. A simplified end-to-end design method is proposed that accounts for 3D printing process errors during the modeling stage. A 3D model correction cycle capable of minimizing the discrepancy between the calculated and experimental characteristics of devices is discussed.

Keywords: *microwave devices, additive technologies, 3D printing, errors, modeling, compensation*

УДК 621.375.4

Влияние толщины диэлектрической пленки на работу устройства выборки хранения

Тюрин Сергей Владимирович tyurinsv@student.bmstu.ru
Андреев Дмитрий Владимирович dmitrii_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено влияние толщины диэлектрической пленки в металл — диэлектрик — полупроводниковом (МДП) конденсаторе на параметры устройства выборки-хранения (УВХ). Проведен анализ влияния уменьшения и увеличения толщины слоя окисла кремния (SiO_2) на емкость, точность выборки, время удержания и надежность работы устройства. Определены основные тенденции изменения характеристик и предложены рекомендации по выбору оптимальной толщины диэлектрика.

Ключевые слова: *устройство выборки-хранения, МДП-конденсатор, окисел кремния, емкость, утечки, время удержания*

Устройства выборки-хранения (УВХ) широко применяются в аналого-цифровых преобразователях и цифровых системах обработки сигналов. Их основная функция заключается в захвате и удержании уровня входного аналогового сигнала в течение определенного времени, необходимого для дальнейшей цифровой обработки [1, 2].

Основным элементом хранения в УВХ является конденсатор, параметры которого в значительной степени определяют точность и стабильность работы устройства. Наиболее эффективным решением является применение металл — диэлектрик — полупроводниковых (МДП) структур, обеспечивающих высокую степень интеграции и стабильность характеристик [3].

На рис. 1 приведена функциональная схема рассматриваемого УВХ.

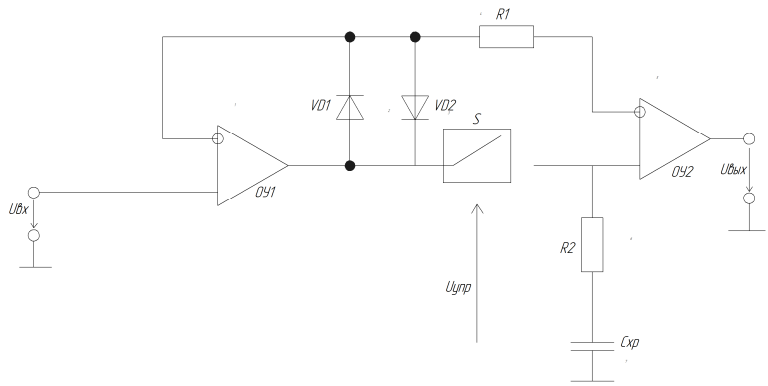


Рис. 1. Функциональная схема рассматриваемого УВХ

Структуры МДП конденсатора. В МДП-конденсаторе нижней обкладкой выступает диффузионная область n^+, формируемая одновременно с созданием эмиттерной области транзистора, верхней — алюминиевая металлизация. В качестве диэлектрика используется тонкий слой двуокиси кремния (SiO_2), обеспечивающий электрическую изоляцию и требуемую емкость. Толщина слоя окисла является одним из ключевых параметров, определяющих как электрические характеристики, так и надежность конденсатора.

На рис. 2 приведена структура конденсатора, сформированного на основе МДП-структуры.

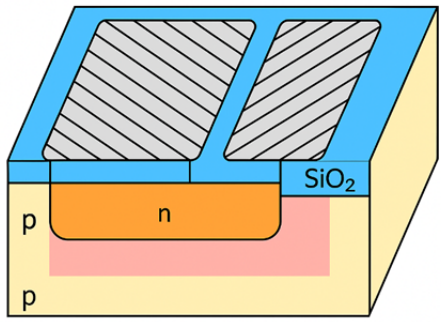


Рис. 2. Структура конденсатора, сформированного на основе МДП-структуры

При подаче напряжения между обкладками в диэлектрике накапливается заряд, а в полупроводнике формируется область пространственного заряда (ОПЗ). Емкость такой структуры зависит от толщины диэлектрика (d), диэлектрической проницаемости (ε) и площади обкладок (S):

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$

Отсюда видно, что уменьшение толщины окисла увеличивает емкость, однако вызывает рост электрического поля и вероятность пробоя [4].

На рис. 3 представлена зависимость емкости МДП-конденсатора от толщины диэлектрика.

Влияние толщины диэлектрика на характеристики УВХ.

1. Рассмотрим вариант 1, уменьшив толщину окисла. Уменьшение ведет к увеличению емкости, что повышает точность выборки и снижает чувствительность к шумам. При толщине менее ~5 нм начинают проявляться квантово-механические туннельные токи. Это приводит к ускоренному разряду конденсатора и снижению времени удержания сигнала. При слишком малой емкости возрастает вероятность пробоя, что ограничивает диапазон входных сигналов.

2. Рассмотрим вариант 2, увеличив толщину окисла. При увеличении толщины диэлектрического слоя емкость уменьшается, что приводит к снижению точности выборки и увеличению погрешности хранения. При этом

время удержания сигнала возрастает, так как утечки через диэлектрик становятся меньше. Однако из-за уменьшения емкости устройство становится более чувствительным к помехам и дрейфу напряжения на входе.

В интегральных УВХ, работающих при напряжениях 3–5 В, оптимальная толщина SiO_2 обычно находится в пределах 10–30 нм**.** Это значение обеспечивает достаточную емкость (единицы–десятки пикофарад) при приемлемых токах утечки (10^{-12}–10^{-14} А). При проектировании микросхем высокого быстродействия применяются более тонкие диэлектрики, но с контролем пробойных напряжений и утечек [5].

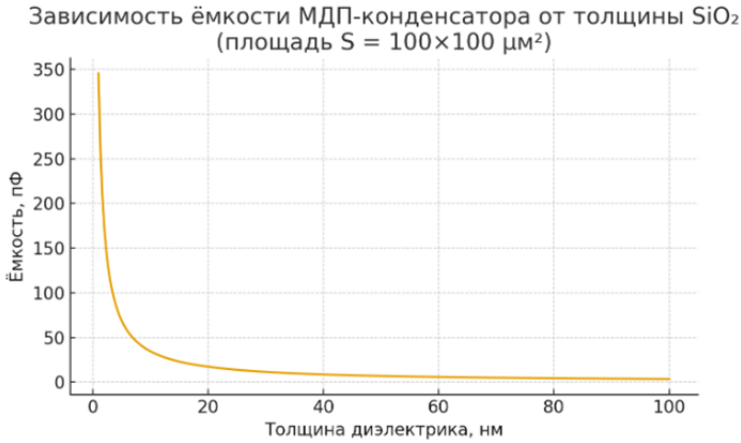


Рис. 3. Зависимость емкости МДП-конденсатора от толщины диэлектрика

Заключение. Толщина диэлектрической пленки оказывает значительное влияние на параметры и надежность устройства выборки-хранения. При уменьшении толщины повышается емкость и точность выборки, но возрастают туннельные токи и риск пробоя. При увеличении толщины улучшаются изоляционные свойства, однако снижается емкость и ухудшается динамика работы устройства.

Оптимальная толщина диэлектрического слоя SiO_2 должна определяться исходя из компромисса между емкостью, утечками и временем удержания сигнала, что особенно важно при проектировании высокоточных аналого-цифровых систем.

Список источников

[1] Андреев В.В., Столяров А.А., Ахмелкин Д.М., Романов А.В. Сильнополевая инжекционная модификация наноразмерных диэлектрических пленок в МДП-приборах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 6(18), с. 1–14. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-6-802

[2] Воротилов К.А., Лучников П.А., Подгорный Ю.В., Серегин Д.С. Особенности измерения диэлектрической проницаемости тонких пленок МДП-структур. *Вестник науки Сибири*, 2011, № 1(1), с. 220–228.

[3] Kuznetsov V.V, Andreev D.V., Andreev V.V., Piskunov S., Popov A.I. The Compact Model Synthesis for the RADFET Device. *Technologies*, 2025, vol. 13, art. no. 492(1-10). https://doi.org/10.3390/technologies13110492

[4] Векслер М.И., Тягинов С.Э., Илларионов Ю.Ю. и др. Общая процедура расчета электрических характеристик туннельных МДП-структур. *Физика и техника полупроводников*, 2013, т. 47, с. 675–683.

[5] Horowitz P., Hill W., Robinson I. *The art of electronics.* Cambridge, Cambridge university press, 1989, vol. 2, 658 p.

The influence of dielectric film thickness on the operation of a sample-and-hold device

Tyurin Sergey Vladimirovich tyurinsv@student.bmstu.ru
Andreev Dmitry Vladimirovich dmitrii_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article examines the effect of dielectric film thickness in a metal–insulator–semiconductor (MIS) capacitor on the parameters of a sample-and-hold device (SHD). An analysis is provided of the effects of increasing and decreasing the silicon oxide (SiO_2) layer thickness on the capacitance, sample-and-hold accuracy, retention time, and device reliability. Key performance trends are identified, and recommendations for selecting the optimal dielectric thickness are provided.

Keywords: *sample-and-hold device, MIS capacitor, silicon oxide, capacitance, leakage, retention time*

УДК 621.317

Применение метода импульса линии передач в проектировании и анализе полупроводниковых приборов

Шахаев Богдан Маратович shakhaev762@mail.ru
Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru
Полпудников Сергей Викторович polpud@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен принцип работы технологии TLP (Transmission Line Pulse), основанный на генерации сигнала с помощью длинных линий. Описана методика получения характеристик и основных параметров структуры защиты полупроводниковых приборов и интегральных микросхем от электростатического разряда. Приведен пример характеристики, получаемый в результате тестирования полупроводниковой структуры на воздействие электростатического воздействия. Рассмотрены основные направления применения TLP-установок на этапах проектирования и испытания полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: *TLP-установка, электростатический разряд (ЭСР), защитные структуры ИМС, вольт-амперная характеристика (I-V характеристика), генератор TLP-сигнала*

При проектировании стойких к ЭСР интегральных микросхем (ИМС) важно гарантировать их надежность. Для анализа структуры защиты ИМС традиционно применяют модель человеческого тела (HBM) и модель машины (MM), однако эти методы не предоставляют достаточных данных о природе возникающего отказа.

На текущий момент для глубокого изучения подобных структур применяют метод проведения анализа защиты с помощью прямоугольного импульса линии передачи (Transmission Line Pulse — TLP), который позволяет получить больше информации по сравнению с другими методами.

Целью этой статьи является рассмотрение современных возможностей TLP-технологии и ее применения в создании надежных ИМС.

Принцип работы TLP-систем. Основным элементом установки для проведения анализа является генератор TLP, показанный на рис. 1. Однако представленная модель генератора не обеспечивает достаточно точное описание реальной установки TLP из-за возникающих потерь во время его работы [1].

Для стабилизации параметров получаемого импульса в реальных установках используют схему, представленную на рис. 2. Данная схема позволяет обеспечить более стабильные параметры благодаря фильтру переднего фронта сигнала и аттенюатору, согласующему выходное сопротивление линии передачи и тестируемого изделия (Device Under Test, DUT) [2, 3].

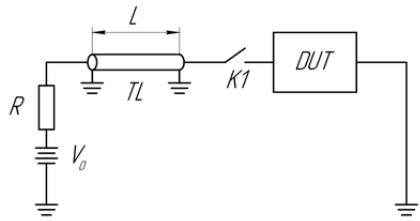


Рис. 1. Схема базовой TLP-установки

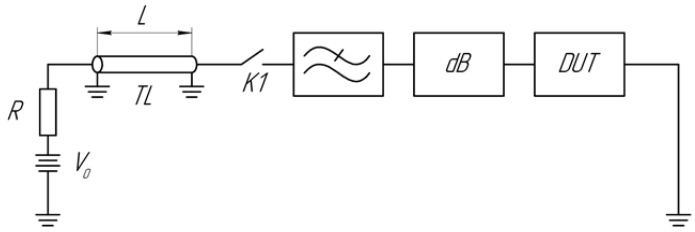


Рис. 2. Схема реальной установки TLP

Результатом анализа установкой TLP является вольт-амперная характеристика (I-V характеристика), представленная на рис. 3 слева. Для ее получения линию передачи заряжают до необходимого напряжения и подают импульс на DUT. Напряжение с каждым импульсом повышается до момента выхода из строя тестируемого изделия. Для контроля возникающих утечек после каждого импульса происходит замер электрических параметров.

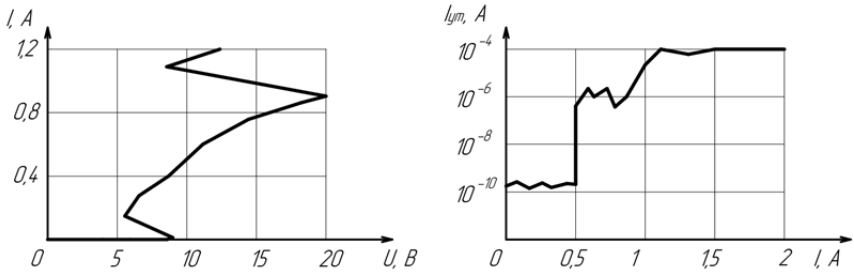


Рис. 3. Сравнение I-V характеристики (*слева*) и возникающих токов утечек (*справа*)

Основные параметры, которые определяются по I-V характеристике:

– напряжение срабатывания защитной структуры;

– дифференциальное сопротивление на каждом участке характеристики;

– значения тока и напряжения вторичного пробоя, после которого происходят необратимые повреждения.

Для токов утечек строят зависимость от тока импульса, представленную на рис. 3 справа. Данная характеристика показывает, какое влияние оказывает воздействие импульсов от установки на защитную структуру. Замер токов утечек производят после каждого воздействся импульсов.

Сопособы применения TLP. В статье [4] описан и апробирован метод контроля защиты на кристалле, находящемся под режимом. Данный метод анализа позволил продемонстрировать влияние существующих смещений на выводах ИМС на величину значений, при которых возникает необратимый пробой.

Также было проведено апробирование TLP-установки на входах одной схемы с различным конструктивным исполнением. В результате анализа статистических данных было получено сильное различие параметров как первичного срабатывания защитной структуры, так и параметров вторичного пробоя.

Из продемонстрированных в статье данных можно сделать вывод о необходимости проведения тестирования входов микросхем под различными режимами и анализа путей по которым производится разряд ЭСР.

В работе [5] представлена зависимость I-V характеристик запитанных и незапитанных усилителей. В результате были получены значительно более низкие значения тока и напряжения выхода из строя ИМС по сравнению с замерами без смещения. I-V характеристика позволила произвести анализ путей разряда ЭСР.

В статье [6] представлена схема преобразования прямоугольного импульса, генерируемого TLP, в импульс модели HMM (Human Metal Model) по стандарту IEC 61000-4-2. Преобразование импульса в данной установке происходит с помощью формирующей цепи и линии задержки. Проведена апробация установки TLP-HMM на различных структурах и приведены значения их пробоя в сравнении со стандартными TLP и HMM.

На данный момент основная область применения I-V характеристик — это извлечение параметров структур для создания моделей. Более точные модели позволяют лучше предсказывать поведение как защитных структур, так и отдельных компонентов. В статье [7] была разработана модель диффузионного резистора, позволяющая производить моделирование защиты ИМС от ЭСР. В работе [8] был представлен расчет диода с прямым смещением и проведено сравнение с реальным диодом с помощью VF-TLP (Very-Fast TLP).

Также тенденцией применения I-V характеристик является тестирование и изучение широкозонных полупроводников в импульсных режимах [9].

Заключение. Анализ представленных исследования показывает, что технология генератора TLP имеет наиболее широкое применение в области контроля на стойкость к электростатическим разрядам. Основным преимуществом данной методики является ее универсальность и повышенная информативность. Она используется как для получения пороговых значений защитных сытрукутр, так и моделирования более сложных систем учитыва-

ющих возникновение паразитных элементов. TLP-методика стала важным этапом в определении параметров при построении моделей для создания более устойчивых и надежных устройств следующего поколения.

Список источников

[1] Lafon F., De Daran F., Rigour S., Lagrange J., Ramdani M., Drissi M. Fine Modeling of Transmission Line Pulse (TLP) and Exploitation for Measurement Set-Up Optimization. *9th International Symposium on EMC Joint with 20th International Wroclaw Symposium on EMC*, 2010, pp. 769–774. https://doi.org/10.23919/EMC.2010.10826305

[2] Максимов И.В., Кузнецов В.В., Андреев В.В. Исследование модернизированной схемы защиты от электростатического разряда КМОП ИМС серии 1564. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2014, № 4, с. 35–41.

[3] Кузнецов В.В., Андреев В.В. Установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. *Приборы и техника эксперимента*, 2024, № 2, с. 64–69. https://doi.org/10.31857/S0032816224020087

[4] Smedes T., Velghe R.M.D.A, Ruth R.S., Huitsing A.J. The application of transmission line pulse testing for the ESD analysis of integrated circuits. *Journal of Electrostatics*, 2002, vol. 56, iss. 3, pp. 399–414. https://doi.org/10.1016/s0304-3886(02)00057-8

[5] Giraldo S., Salaméro C., Caignet F. *Impact of the Power Supply on the ESD System Level Robustness*. URL: https://www.researchgate.net/publication/251965958_Impact_of_the_power_supply_on_the_ESD_system_level_robustness (accessed 26.10.2025).

[6] Bèges R. TLP-based Human Metal Model stress generator and analysis method of ESD generators. *37th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD)*, 2015, pp. 1–10. https://doi.org/10.1109/EOSESD.2015.7314777

[7] Kuznetsov V.V., Andreev V.V., Lomakin S.A. Semiconductor Device Compact Simulation Taking Into Account the ESD Effect and Using the Free Circuit Simulation Software. *7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE),* 2025, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10970809

[8] Holland S., Notermans G., Ritter H.M. Modelling transient voltage overshoot of a forward biased pn-junction diode with intrinsic doped region. *40th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD)*, 2018, pp. 1–9. https://doi.org/10.23919/EOS/ESD.2018.8509760

[9] Xin Y. Electrostatic Discharge (ESD) Behavior of p-GaN HEMTs. *32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, 2020, pp. 317–320. https://doi.org/10.1109/ISPSD46842.2020.9170063

Application of the transmission line pulsing method in the design and analysis of semiconductor devices

Shakhaev Bogdan Maratovich **shakhaev762@mail.ru**
Kuznetsov Vadim Vadimovich **vadim.kuznetsov@bmstu.ru**
Andreev Vladimir Viktorovich **vladimir_andreev@bmstu.ru**
Polpudnikov Sergey Viktorovich **polpud@yandex.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The operating principle of the TLP (Transmission Line Pulsing) technology, based on signal generation using long transmission lines, is presented. A methodology for obtaining the characteristics and main parameters of protective structures for semiconductor devices and integrated circuits against electrostatic discharge is described. The main areas of application of TLP systems at the stages of design and testing of semiconductor devices are considered.

Keywords: *TLP system, electrostatic discharge (ESD), IC protection structures, current-voltage characteristic (I-V characteristic), TLP signal generator*

УДК 621.317

Особенности разработки правил проверки проектирования резисторов сложной формы в среде KLayout

Гришин Григорий Константинович grishingk@bmstu.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы разработки правил проверки проектирования (DRC) для резисторов сложной формы в среде KLayout. Предложены алгоритмы верификации резисторов — меандров с использованием методов эрозии — дилатации и валидации взаимодействия областей. Разработаны скрипты для контроля минимальной и максимальной ширины резистора, а также дистанции между элементами в резистивном слое. Практическая значимость работы заключается в создании набора правил DRC, позволяющих корректно верифицировать резисторы сложной формы при проектировании микроэлектронных устройств.

Ключевые слова: *DRC, KLayout, резисторы, правила проектирования, метод эрозии — дилатации*

В аналоговой микроэлектронике точное значение сопротивления является критическим параметром, определяющим работоспособность всего устройства [1, 2]. Для достижения высоких номиналов сопротивления при ограниченной площади кристалла разработчики часто прибегают к использованию резисторов сложной топологии, реальная длина которых значительно превосходит их кажущийся размер. Однако при таком подходе возникает серьезная проблема: стандартные правила проверки проектирования (DRC) ориентированы на проверку резисторов простой формы. В данной работе рассматриваются некоторые варианты применения комбинаций стандартных правил, которые позволяют правильно верифицировать резисторы сложной формы [3].

Разработка правил проверки проектирования (DRC). Одним из наиболее распространенных методов снижения площади, занимаемой резистивным элементом в топологии кристалла, является формирования резистора в виде меандра. Ключевой проблемой, возникающей при верификации такой топологии является некорректность определения локальной ширины сегментов меандра, таким образом нарушения правил проектирования либо не отображаются, либо отображаются некорректно.

В таблице приведены основные правила проектирования для высокоомных тонкопленочных резисторов в рамках используемой технологии.

Правила проектирования для резисторов

Параметр	Значение
Минимальная ширина (min_width)	5,0 мкм
Максимальная ширина (max_width)	20,0 мкм
Минимальная дистанция (min_space)	6,0 мкм

Для определения минимальной ширины сегмента меандра предлагается использовать два метода: метод эрозии — дилатации (сжатие — расширение) и дополнительная валидация методом взаимодействия областей. Механизм метода эрозии — дилатации заключается в выявлении локальных нарушений ширины, путем сравнения исходного слоя с его реконструированной версией после эрозии — дилатации [4]. Области с шириной, соответствующей нормам, полностью восстанавливаются, в то время как зоны с нарушением просто не создаются, что и фиксируется как нарушение правил проектирования [5]. С использованием данных методов получена функция:

```
KLayout DRC script
# хэш-таблица слоев
$layers_hash = (‘res1’ = > ’1,0’)
# объявление переменных
res_layer = input($layers_hash[‘res1’])
rule = 5.um
# эрозия полигонов в слое
shrunk = res_layer.sized(-rule / 2.01)
# дилатация полигонов в слое
expanded = shrunk.sized(rule/2.01)
# получение ошибок эрозии-дилатации
err1 = res_layer.not(expanded)
# проверка взаимодействия областей
inner_region = res_layer.interacting(res_layer.sized(-rule / 2.01))
 err2 = res_layer.not_interacting(inner_region)
# получение всех ошибок
all_err = err1 + err2
# вывод сообщения об ошибке
all_err.output(“Min resistor width: #{rule} um”)
```

Для определения максимальной ширины также используется метод эрозии — дилатации. Получена следующая функция:

```
KLayout DRC script
# хэш-таблица слоев
$layers_hash = (‘res1’ = > ’1,0’)
# объявление переменных
res_layer = input($layers_hash[‘res1’])
rule = 20.um
# эрозия полигонов в слое
shrunk = res_layer.sized(-rule / 2)
# дилатация полигонов в слое, выявление ошибок
expanded = shrunk.sized(rule/2)
all_err = expanded
# вывод сообщения об ошибке
all_err.output(“Max resistor width: #{rule} um”)
```

Для определения дистанции достаточно воспользоваться стандартной функцией space:

```
KLayout DRC script
# хэш-таблица слоев
$layers_hash = (‘res1’ = > ’1,0’)
# объявление переменных
res_layer = input($layers_hash[‘res1’])
rule = 6.um
# проверка дистанции
err = res_layer.space(rule)
# вывод сообщения об ошибке
all err.output(“Max resistor space: #{rule} um”)
```

На рис. 1 представлен тестовый резистор, который необходим для проверки работоспособности скриптов DRC.

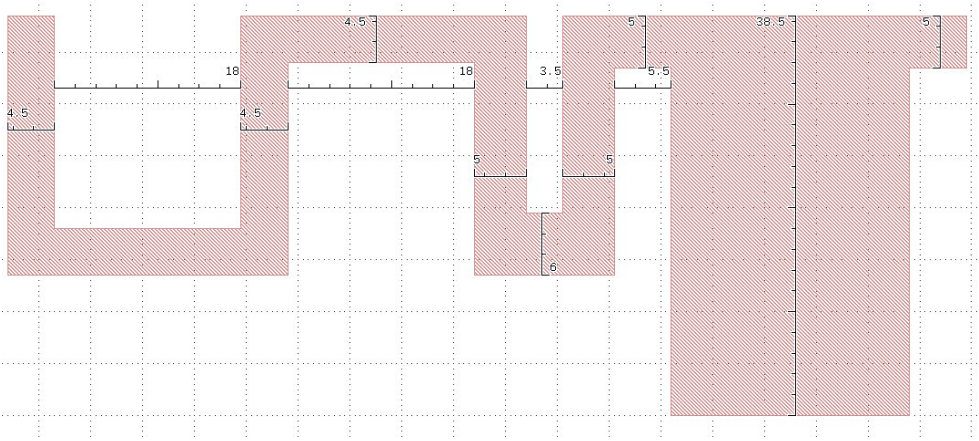


Рис. 1. Тестовая структура

После применения разработанных скриптов отображено 4 ошибки, допущенные при проектировании данного резистора. Контекстное меню приведено на рис. 2.

При подсвечивании ошибок получен результат, приведенный на рис. 3.

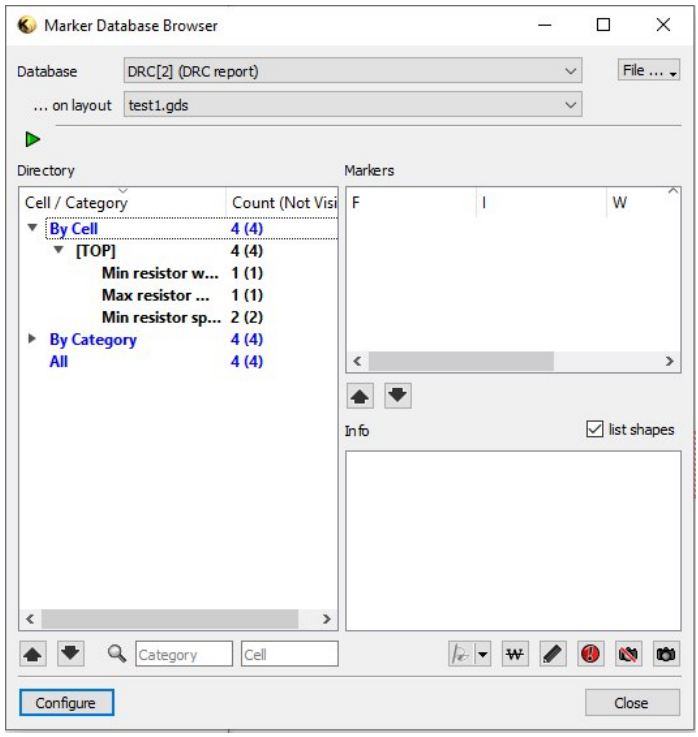


Рис. 2. Контекстное меню с выведенными ошибками

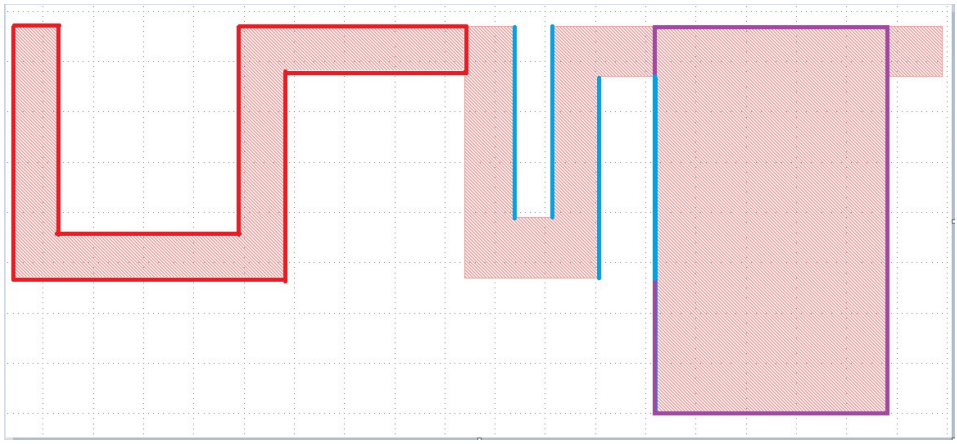


Рис. 3. Подсвеченные полигоны, не прошедшие DRC:
красное выделение — ошибки по минимальной ширине; синее выделение — ошибки по минимальной дистанции (выделяется как пара граней); фиолетовое выделение — ошибки по максимальной ширине

Вывод. В ходе работы разработан набор правил проверки проектирования для резисторов сложной формы, позволяющий правильно их верифицировать.

Список источников

[1] Андреев Д.В., Корнев С.А., Андреев В.В. Влияние материала затвора на процессы сильнополевой деградации структур металл — диэлектрик — полупроводник. *Необратимые процессы в природе и технике. XIII Всерос. конф.: сб. ст.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, т. 1, с. 7–9.

[2] Andreev V.V., Anreev D.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of high-field electron injection for wafer-level testing of gate dielectrics of MIS devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, no. 7, art. no. 102.

[3] *KLayout DRC Manual.* URL: https://klayout.de/doc/manual/drc_basic.html (accessed 29.10.2025).

[4] Оглуздина Ю.А., Пескова О.В. Алгоритмы сегментации изображений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение*, 2013, № 4, с. 122–134.

[5] *Анализ и обработка изображений с использованием операций математической морфологии, python и библиотеки OPEV*. URL: https://habr.com/ru/articles/565378 (дата обращения 29.10.2025).

Features of developing design rule checks of complex-shaped resistors in the KLayout environment

Grishin Grigorii Konstantinovich grishingk@bmstu.ru
Andreev Vladimir Viktorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article examines methods for developing design rule checks (DRC) for resistors of complex shapes in the KLayout environment. Algorithms for verifying meander resistors are proposed, using erosion-dilation methods and region interaction validation. Scripts have been developed to control the minimum and maximum width of a resistor, as well as the distance between elements in the resistive layer. The practical significance of the work lies in creating a set of DRC rules that allow for correct verification of resistors with complex shapes in the design of microelectronic devices.

Keywords: *DRC, KLayout, resistors, design rules, erosion-dilation method*

УДК 621.375.4

Оптимизация входной схемы ИМС четырехканального операционного усилителя

Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Лыков Дмитрий Анатольевич lykov@bmstu.ru
Козлов Александр Игоревич kozlovai@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Объектом исследования является инструментальный операционный усилитель (ОУ), на входах которого реализована входная группа на основе Р-канальных полевых транзисторах. В ходе работы были подробно проанализированы методы оптимизации входных характеристик операционного усилителя, включая повышения скорости нарастания выходного сигнала, при относительно небольшом токе потребления. Исследование проводилось с применением современных средств схемотехнического моделирования, а также физическое измерение опытной партии ОУ, что позволило тщательно оценить влияние различных решений и компонентов на итоговые параметры ОУ.

Ключевые слова: *операционный усилитель, ОУ, моделирование, проектирование, измерение*

Использование полевых транзисторов во входных каскадах операционных усилителей оказало существенное влияние на их электрические характеристики и области применения. Переход от биполярных к полевым структурам значительно снизил входные токи смещения, что позволило достичь крайне высокого входного сопротивления и минимизировать влияние усилителя на источник сигнала. Данное решение особенно эффективно при работе с высокоомными источниками, такими как пьезоэлектрические преобразователи, фотодиоды и резистивные делители напряжения большого номинала [1].

Применение полевых транзисторов также улучшило стабильность постоянных режимов за счет снижения температурной зависимости входных токов и уменьшения дрейфа смещения нуля. В результате повысилась точность измерительных и интегрирующих схем, в которых токи утечки критичны для долговременной стабильности. Дополнительным преимуществом является уменьшение необходимости балансировки цепей по постоянному току и ослабление требований к симметрии элементов входного каскада [2].

Преимущества ОУ с входными полевыми каскадами. Входные каскады операционных усилителей, реализованные на полевых транзисторах, обладают рядом уникальных физических и схемотехнических свойств, проявляющихся в повышенных динамических характеристиках — прежде всего в скорости нарастания выходного напряжения и мгновенном времени реакции на резкие изменения входного сигнала [3].

Высокое входное сопротивление и минимальные входные токи существенно уменьшают величину паразитных емкостей входного узла, что снижает интегральные временные задержки по входу и расширяет полосу пропускания ОУ. Именно минимизация емкостных и резистивных составляющих входа ведет к ускорению переходных процессов и росту скорости нарастания выходного сигнала — для JFET-ОУ этот показатель достигает 15–30 В/мкс [4].

Полевые транзисторы обладают существенно меньшей эмиттерной емкостью и отсутствием носителей в затворной структуре, поэтому входной каскад быстрее реагирует на сигнал и эффективнее перерабатывает высокочастотные компоненты. Благодаря этому ОУ с ПТ на входе демонстрируют минимальное время запаздывания фронта, обеспечивая высокую точность воспроизведения и усиления быстрых импульсных процессов [1].

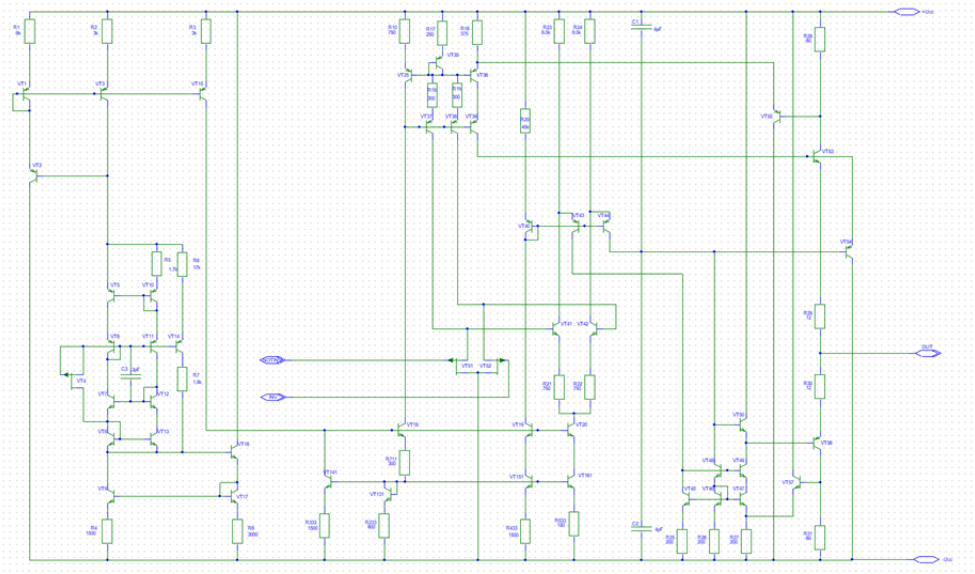


Рис. 1. Принципиальная схема канала ОУ

На рис. 1 представлен канал операционного усилителя. Схема состоит из источника тока, находящегося в левой части схемы и двух усилительных каскадов. На входе дифференциального каскада применены полевые Р-канальные транзисторы, которые обеспечивают необходимые выходные характеристики. Операционный усилитель включен по схеме повторителя (рис. 2). Результаты моделирования и измерения времени нарастания выходного сигнала представлены на рис. 3, 4 [2].

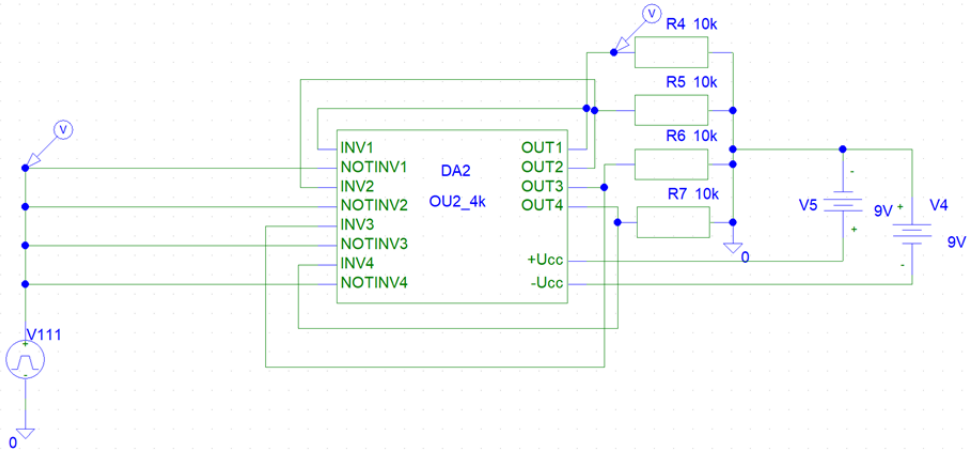


Рис. 2. Схема включения

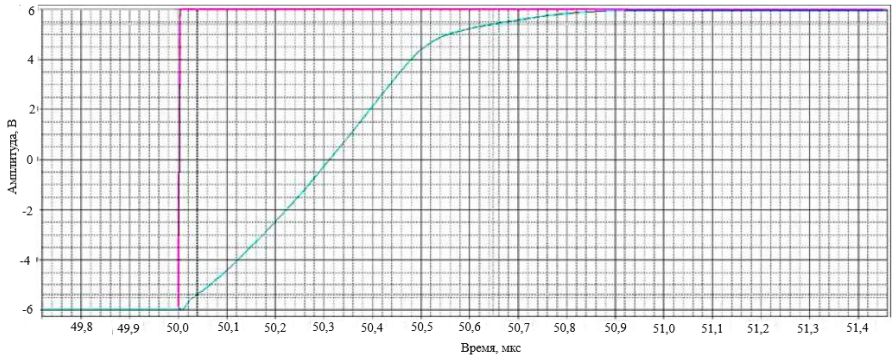


Рис. 3. Результаты моделирования ОУ

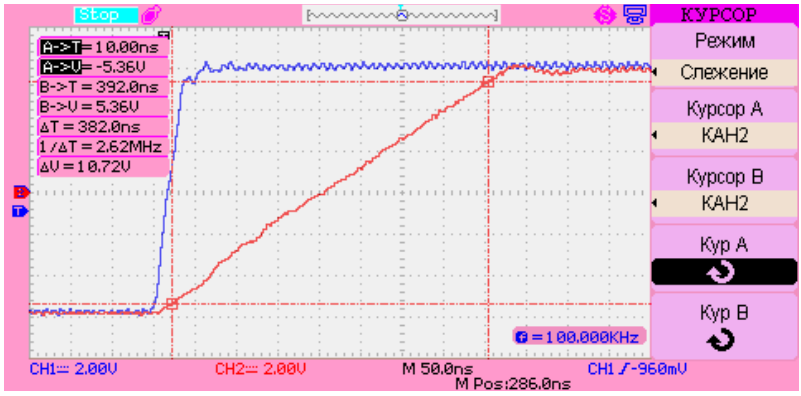


Рис. 4. Результаты измерения образцов

Заключение. Применение полевых транзисторов на входе ОУ приводит к увеличению скорости нарастания выходного сигнала, уменьшению времени задержки фронта, расширению частотной полосы и сохранению высокой линейности работы даже при существенных изменениях входного потенциала. Это создает фундаментальные предпосылки для использования таких ОУ в системах обработки быстрых, малошумящих и динамических сигналов различной физической природы — от измерительных преобразователей до трактов передачи данных [5].

Список источников

[1] Картер Б., Манчини Р. *Операционные усилители для всех.* Москва, ДМК Пресс, 2016, 528 с.

[2] Николаев В.Г. *Моделирование в проектировании электронных устройств*. Москва, Техносфера, 2004.

[3] Бутковский Ю.П., Токарев И.В. *Моделирование в электронных устройствах.* Москва, Машиностроение, 1989.

[4] Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. *OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга.* Москва, СОЛОН-Пресс, 2005, 200 с.

[5] Horowitz P., Hill W., Robinson I. *The art of electronics.* Cambridge, Cambridge university press, 1989, vol. 2, 658 p.

Optimization of the input circuit of a four-channel operational amplifier IC

Kuznetsov Vadim Vadimovich vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Lykov Dmitry Anatolyevich lykov@bmstu.ru
Kozlov Alexander Igorevich kozlovai@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The object of research is an instrumental operational amplifier (OA), at the inputs of which an input group based on P-channel field-effect transistors is implemented. In the course of the work, methods for optimizing the input characteristics of the operational amplifier, including increasing the rate of increase of the output signal, with a relatively small consumption current, were analyzed in detail. The study was carried out using modern means of circuit modeling, as well as physical measurement of the experimental batch of op-amps, which made it possible to carefully assess the impact of various solutions and components on the final op-amps parameters.

Keywords: *operational amplifier, OA, modeling, designing, measuring*

УДК 621.317.791

Методы и оборудование для контроля параметров и испытаний интегральных микросхем

Андреев Дмитрий Игоревич zir-andreew@yandex.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлено подробное описание такого процесса в производстве интегральных микросхем, как испытания. Данный этап является важным этапом производства интегральных микросхем, направленным на проверку качества изделий перед их выпуском на рынок. Испытания интегральных микросхем включают в себя внешний вид, контроль электрических параметров при нормальных климатических условиях и контроль электрических параметров при экстремальных температурах. Рассмотрено оборудование, используемое в процессе испытаний интегральных микросхем. Сделаны выводы, что при корректной настройке оборудования, можно достичь эффективную разбраковку интегральных микросхем.

Ключевые слова: *испытания интегральных микросхем, блок разбраковки, автоматическая испытательная система, цифровой измерительный блок*

В процессе производства электронных компонентов проводится ряд проверок для обеспечения их качества и соответствия требуемым спецификациям. Перед проведением проверок обычно разрабатывается специальный процесс контроля качества, который определяет требования к проверке и подготавливает соответствующие инструменты и оборудование для проведения проверок в производственной линии [1]. Основными методами проверки являются: внешний вид, контроль электрических параметров при нормальных климатических условиях и контроль электрических параметров при экстримальным температурах. На каждом этапе испытания необходимо оборудование, которое позволит получить точные показания. Внешний вид позволяет провести визуальную проверку интегральной схемы. На данном этапе оператор оценивает внешнее состояние интегральной микросхемы, используя микроскоп. Именно с этой операции осуществляется разбраковка. Контроль электрических параметров как при нормальных климатических условиях, так и при экстремальных температурах является одной из самых важных операций в производстве интегральных микросхем [2]. С этого момента начинается испытание интегральной микросхемы по статическим, динамическим и электрическим параметрам. В качестве оборудования, позволяющего произвести быстрое, информативное и гарантированно точное измерение, применяются блоки разбраковки, проходные камеры, а также автоматические испытательные системы.

Блок разбраковки предназначен для контроля и разбраковки статистических, динамических и электрических параметров интегральных микросхем

[3]. Данное устройство состоит из большого множества ЭРЭ, которые выполняют различные функции. В состав блока разбраковки обычно входят: устройство контактное, схема коммутации, генератор импульсов, модуль обработки сигналов, а также стабилизатор напряжения [4].

Основополагающим при измерении параметров при заданной температуре является проходная камера. Проходная камера (ПК) позволяет произвести замер как при пониженной, так и при повышенной температуре. А также позволяет поддерживать температуру определенный промежуток времени. Обычно температура измерения начинается с –60 и достигает +125°. Важным преимуществом является возможность изменять температурный режим в зависимости от ситуации, а также следить за температурой благодаря датчику температуры.

Автоматическая испытательная система (АИС) предназначена для контроля по заданной программе статических параметров цифровых интегральных схем с количеством выводов до 24. К таким видам АИС относятся «И2001», «Велюр», «Вахта», «Бином» и прочие менее популярные системы. Остановимся на АИС «Велюр» и далее рассмотрим данную систему подробно.

В состав автоматизированной испытательной системы входят:

– блок питания И205;
– блок вентиляции Д202;
– блок управления К204;
– сдвоенный программируемый источник напряжения И203;
– сдвоенный программируемый источник напряжения И203;
– сдвоенный программируемый источник напряжения И203;
– цифровой измерительный блок В202;
– матрица М201;
– пульт управления Р202.

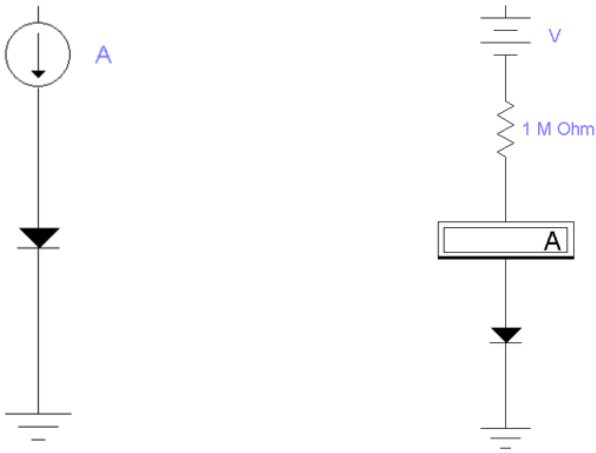
Наибольшее значение в измерении интегральной микросхемы имеет цифровой измерительный блок В202. Цифровой измерительный блок В202 предназначен для сравнения токов и напряжений, поступающих на входы блоков, с их граничными значениями, заданными в цифровой форме и для создания стабилизированного тока в нагрузке. Рассмотрим основные функции блока В202:

– сравнение величины измеряемого напряжения с граничным значением;
– сравнение величины измеряемого тока с граничным значением;
– стабилизация тока, задаваемого в нагрузку и сравнивание напряжения на нагрузке с величиной граничного значения.

Рассмотрим основные режимы работы цифрового измерительного блока В202, схемы которых изображены на рисунке. В режиме сравнения величины измеряемого напряжения с граничным значением блок работает подобно нуль органу, сравнивая две величины напряжения: измеряемую и эталонную. Напряжение, пропорциональное измеренному сигналу, поступает на вход устройства сравнения, где производится сравнение этого сигнала с эталонным, вырабатываемымм двенадцатиразрядным цифро-аналоговым преобра-

зователем. Нуль-органом устройства сравнения является операционный усилитель на плате цифрового измерительного блока В202.

В режиме измерения тока цифровой измерительный блок В202 выполняет две функции: стабилизация напряжения на нагрузке и сравнение величины тока, протекающего через нагрузку с граничным значением. Сравнение тока с граничным значением осуществляется методом преобразования тока в напряжение на эталонном резисторе, расположенном в плате токовых шунтов. Величина эталонного резистора выбрана таким образом, что падение напряжения на нем равно 1 В при протекании тока, соответствующего 100 % выбранной шкалы по току.



а *б*

Схемы режимов работы цифрового измерительного блока В202:
а — сравнение величины измеряемого напряжения с граничным значением;
б — сравнение величины измеряемого тока с граничным значением

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что при отсутствии контактирования осущетвляется ограничение по сравниваемому напряжению, при этом ток начинает произвольно увеличиваться. Особенность данного режима позволяет при некачественном омическом контакте обеспечить контактирование [5]. Для решения данной проблемы следует перевести цифровой измерительный блок В202 в режим сравнения тока.

Список источников

[1] Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. *Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies*. Wiley-IEEE Press, 2009, 624 p.

[2] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, art. no. 102(1-10). https://doi.org/10.3390/technologies12070102

[3] Kuznetsov V.V. HBM, MM, and CBM ESD Ratings Correlation Hypothesis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 1, art. no. 107. https://doi.org/10.1109/temc.2017.2700492

[4] Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modified Ramped Current Stress Technique for Monitoring Thin Dielectrics Reliability and Charge Degradation. *Phys. Status Solidi A.*, 2022, vol. 219, is. 9, art. no. 2100400(1-5). https://doi.org/10.1002/pssa.202100400

[5] Сивченко А.С. Методика определения дефектности подзатворного диэлектрика с использованием ускоренных испытаний тестовых структур. *Известия вузов. Электроника*, 2015, т. 20, № 3, с. 304–312.

Methods and equipment for parameter control and testing of integrated circuits

Andreev Dmitry Igorevich zir-andreew@yandex.ru

Andreev Vladimir Victorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A detailed description of such a process in the manufacture of integrated circuits as testing is provided. This stage is an important stage in the production of integrated circuits, aimed at verifying the quality of products before their release to the market. Integrated circuit tests include the appearance, control of electrical parameters under normal climatic conditions, and control of electrical parameters at extreme temperatures. The equipment used in the process of testing integrated circuits is considered. It is concluded that with the correct configuration of the equipment, effective disassembly of integrated circuits can be achieved.

Keywords: *integrated circuit testing, disassembly unit, automatic test system, digital measuring unit*

УДК 621.317

Исследование микросхемы источника опорного напряжения

Кузин Матвей Максимович matvey.kuzin.17@mail.ru
Андреев Дмитрий Владимирович dmitrii_andreev@bmstu.ru
Лыков Дмитрий Анатольевич lykov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведено исследование опытных образцов отечественной микросхемы источника опорного напряжения (ИОН) в двух вариантах на 1,23 и 2,5 В. Дано описание микросхемы. Экспериментально исследовано соответствие параметров ИОН (опорное напряжение, минимальный рабочий ток, изменение опорного напряжения при изменении рабочего тока) предполагаемым (ориентировочным) нормам. Получены температурные зависимости опорного напряжения в диапазоне температур от –60 до 125 °С. Проведено сравнение исследуемой микросхемы с зарубежным аналогом LM385.

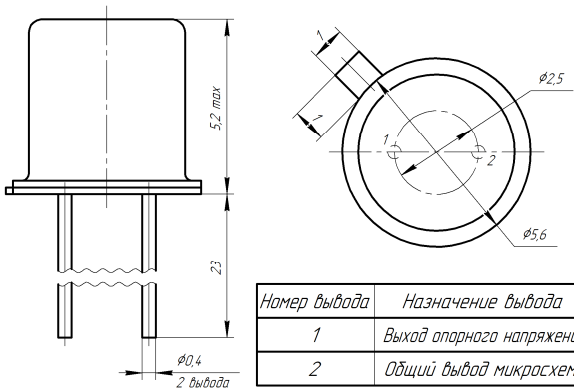
Ключевые слова: *источник опорного напряжения, ИОН, минимальный рабочий ток, температурный коэффициент*

Исследуемая микросхема — микромощный источник опорного напряжения стабилитронного типа на основе ширины запрещенной зоны кремния.

Отличительная особенность схемы — малый динамический импеданс и хорошая температурная устойчивость. За счет использования транзисторов и резисторов достигается малый уровень шумов. ИОН способен выдерживать большую емкостную нагрузку [1].

Данный ИОН может быть использован для создания стабилизаторов или аналоговых схем с питанием от аккумулятора [2].

Назначение и расположение выводов. На рис. 1 представлен корпус исследуемой микросхемы.



Номер вывода	Назначение вывода
1	Выход опорного напряжения
2	Общий вывод микросхемы

Рис. 1. Расположение выводов микросхемы в корпусе КТ-1-4.02Н

Электрические параметры. В табл. 1 и 2 представлены предполагаемые нормы для электрических параметров исследуемой микросхемы и зарубежного аналога LM385.

Таблица 1

Электрические параметры исследуемой микросхемы (1,23 В)

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Режим измерения	Температура,°С	Исследуемая микросхема на 1,23 В		LM385-1.2	
				Не менее	Не более	Не менее	Не более
Опорное напряжение, В	$U_{\text{оп}}$	$I_{\text{раб}} = 1$ мА	25	1,21	1,26	1,21	1,26
Изменение опорного напряжения при изменении рабочего тока, мВ	$\Delta U_{\text{оп}}$	$I_{\text{мин}} < I_{\text{раб}} < 1$ мА	25	–	1	–	1
		1 мА $< I_{\text{раб}} <$ 20 мА	25	–	20	–	20
Минимальный рабочий ток, мкА	$I_{\text{мин}}$	$U_{\text{вых}} = 1{,}21$ В	25	–	15	–	15
Температурный коэффициент опорного напряжения, ppm/°C	$\alpha U_{\text{оп}}$	$I_{\text{раб}} = 100$ мкА	от –60 до 125	–	50	–	50

Таблица 2

Электрические параметры исследуемой микросхемы (2,5 В)

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Режим измерения	Температура,°С	Исследуемая микросхема на 2,5 В		LM385-2.5	
				Не менее	Не более	Не менее	Не более
Опорное напряжение, В	$U_{\text{оп}}$	$I_{\text{раб}} = 1$ мА	25	2,45	2,55	2,425	2,575
Изменение опорного напряжения при изменении рабочего тока, мВ	$\Delta U_{\text{оп}}$	$I_{\text{мин}} < I_{\text{раб}} < 1$ мА	25	–	2	–	2
		1 мА $< I_{\text{раб}} <$ 20 мА	25	–	20	–	20
Минимальный рабочий ток, мкА	$I_{\text{мин}}$	$U_{\text{вых}} = 1{,}21$ В	25	–	20	–	20
Температурный коэффициент опорного напряжения, ppm/°C	$\alpha U_{\text{оп}}$	$I_{\text{раб}} = 100$ мкА	от минус 60 до 125	–	50	–	50

Схема включения. Типовая схема включения ИОН представлена на рис. 2. Резистор R1 задает ток $\boldsymbol{I}$, который, протекая через микросхему (G1), обеспечивает на выходе опорное напряжение $\boldsymbol{U}_{\text{оп}}$ равное 1,23 или 2,5 В. Номинал резистора R1 подбирается исходя из выражения (1):

$$R1 = \frac{U_{cc} - U_{\text{оп}}}{I}. \quad (1)$$

Обычно величина тока I выбирается примерно равной 100 мкА [3].

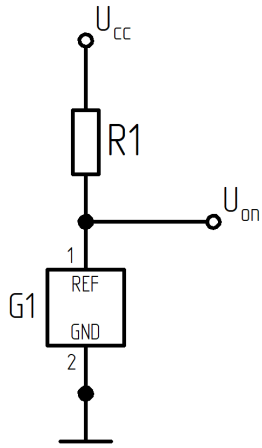


Рис. 2. Типовая схема включения ИОН

Методы измерения параметров. Измерения опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ проводились согласно ГОСТ 18986.15–75 [4]. Измерения минимального рабочего тока $I_{\text{мин}}$ проводились согласно ГОСТ 19799–74 (метод 2620). Схема измерения представлена на рис. 3 [5].

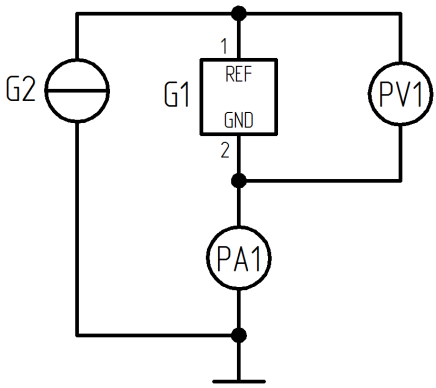


Рис. 3. Схема измерения минимального рабочего тока $I_{\text{мин}}$

Измерения изменения опорного напряжения $\Delta U_{\text{оп}}$ при изменении рабочего тока проводились согласно ГОСТ 19799–74 (метод 1610). Значения $\Delta U_{\text{оп}}$ рассчитывались с помощью выражения (2):

$$\Delta U_{\text{оп}} = |U_{\text{оп2}} - U_{\text{оп1}}|, \quad (2)$$

где $U_{\text{оп2}}, U_{\text{оп1}}$ — значения опорного напряжения при значениях рабочего тока, при которых измерялись напряжения [5].

Измерения температурного коэффициента опорного напряжения $\alpha U_{\text{оп}}$ проводились согласно ГОСТ 18986.17–73. Значения $\alpha U_{\text{оп}}$ рассчитывались с помощью выражения (3):

$$\alpha U_{\text{оп}} = \frac{|U_{\text{оп125}} - U_{\text{оп60}}| \cdot 10^6}{U_{\text{оп}} \cdot \Delta T}, \quad (3)$$

где $U_{\text{оп}}, U_{\text{оп125}}, U_{\text{оп60}}$ — значения опорного напряжения при н.у., при температуре 125 и –60 °С; $\Delta T = 125 - (-60) = 185$ °С — изменение температуры [6].

Результаты измерения электрических параметров. Результаты измерения электрических параметров 8 образцов ИОН (1,23 В) представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Результаты измерений электрических параметров исследуемой микросхемы (1,23 В) при н.у.

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$U_{\text{оп}}$	В	1,2391	1,237	1,2377	1,2369	1,2378	1,234	1,2398	1,2394	1,237713
$I_{\text{мин}}$	мкА	5,4447	5,2455	5,4445	5,2453	5,2454	5,345	5,1954	5,3948	5,320075
$\Delta U_{\text{оп}}$	мВ	0,8147	0,9758	0,3945	0,9367	0,0392	0,9412	0,762	0,9397	0,725475
		14,2742	14,6703	14,729	15,9487	15,1732	15,747	15,5	14,8992	15,1177

Таблица 4

Результаты измерений электрических параметров исследуемой микросхемы (1,23 В) при температуре –60 °С

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$U_{\text{оп}}$	В	1,2421	1,2399	1,2415	1,2401	1,2418	1,2371	1,2422	1,2431	1,240975
$I_{\text{мин}}$	мкА	5,6438	5,4442	5,6933	5,3945	5,4944	5,4944	5,4446	5,6436	5,5316

Таблица 5

Результаты измерений электрических параметров исследуемой микросхемы (1,23 В) при температуре 125 °С

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$U_{\text{оп}}$	В	1,2285	1,2272	1,2269	1,2283	1,2272	1,2247	1,2314	1,2291	1,227913
$I_{\text{мин}}$	мкА	5,4933	5,1446	5,5429	5,4931	6,1925	5,8937	6,093	6,7927	5,830725

Все измеренные параметры образцов микросхемы (1,23 В) соответствуют нормам и уступает зарубежному аналогу LM385-1.2.

Результаты измерения электрических параметров 8 опытных образцов ИОН (2,5 В) представлены в табл. 6–8.

Таблица 6

Результаты измерений электрических параметров исследуемой микросхемы (2,5 В) при н.у.

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$U_{\text{оп}}$	В	2,5117	2,5018	2,5037	2,5049	2,5003	2,5067	2,501	2,5004	2,503813
$I_{\text{мин}}$	мкА	15,5988	15,4986	15,3983	15,7985	15,4988	15,4986	15,4987	15,4986	15,53611
$\Delta U_{\text{оп}}$	мВ	1,9335 15,4548	1,8778 15,0919	1,8854 15,5873	1,8884 15,1642	1,9667 16,2665	1,8101 15,9126	1,8598 16,1942	1,8251 16,6957	1,88085 15,7959

Таблица 7

Результаты измерений электрических параметров исследуемой микросхемы (2,5 В) при температуре –60 °С

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$U_{\text{оп}}$	В	2,5218	2,5122	2,5144	2,5155	2,5105	2,516	2,5128	2,5111	2,514288
$I_{\text{мин}}$	мкА	20,096*	19,996	19,896	20,496*	20,096*	20,096*	19,9961	19,9961	20,0835*
Примечания: * — результаты, не соответствующие нормам для данной микросхемы (данное обозначение используется и последующих табл.).										

Таблица 8

Результаты измерений электрических параметров исследуемой микросхемы (2,5 В) при температуре 125 °С

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$U_{\text{оп}}$	В	2,4845	2,4747	2,4768	2,4779	2,4735	2,4809	2,471	2,4715	2,47635
$I_{\text{мин}}$	мкА	11,592	11,4922	11,3921	11,6917	11,4924	11,4923	11,4923	11,4927	11,51721

Значения параметров $U_{\text{оп}}$ и $\Delta U_{\text{оп}}$ опытных образцов микросхемы (2,5 В) соответствуют нормам и не уступает зарубежному аналогу LM385-2.5.

Значения параметра $I_{\text{мин}}$ не соответствуют нормам при температурах –60 °С (4 из 8 образцов) и уступает зарубежному аналогу LM385-2.5.

Исследование температурной зависимости опорного напряжения. В табл. 9 представлены результаты измерений температурного коэффициента опорного напряжения $\boldsymbol{\alpha U}_{\text{оп}}$ в диапазоне температур от –60 до 125 °С для исследуемого ИОН (1,23 В).

Таблица 9

Результаты измерений температурного коэффициента опорного напряжения $\boldsymbol{\alpha U}_{\text{оп}}$ для ИОН (1,23 В)

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с5	м/с6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$\alpha U_{\text{оп}}$	ppm/°C	60,224*	55,955*	65,104*	52,0297*	64,656*	55,653*	47,545	61,524*	57,83634*

Значения параметра $\alpha U_{\text{оп}}$ образцов опытных образцов микросхемы не соответствуют нормам (7 из 8 образцов) и уступает зарубежному аналогу LM385-1.2. Найдем температурную зависимость опорного напряжения (рис. 4).

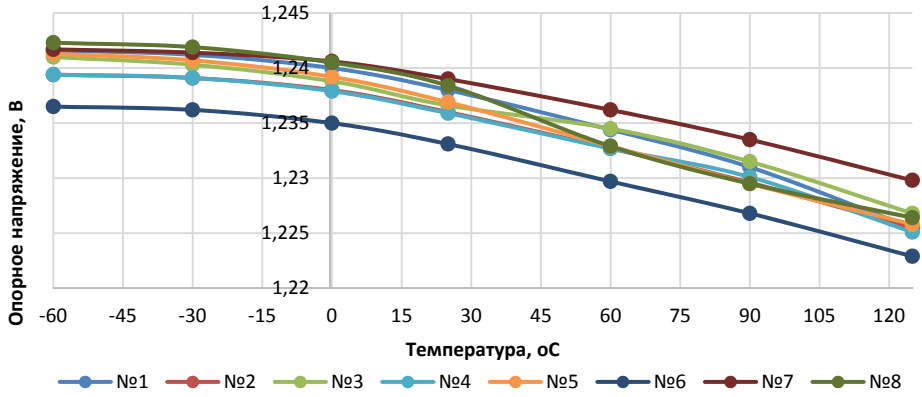


Рис. 4. Графики зависимости $U_{\text{оп}}(T)$

В табл. 10 представлены результаты измерений температурного коэффициента опорного напряжения $\alpha U_{\text{оп}}$ в диапазоне температур от –60 до 125 °С для исследуемого ИОН (2,5 В).

Таблица 10

Результаты измерений температурного коэффициента опорного напряжения $\boldsymbol{\alpha U}_{\text{оп}}$ для ИОН (2,5 В)

Параметр	Ед. изм.	м/с 1	м/с 2	м/с 3	м/с 4	м/с 5	м/с 6	м/с 7	м/с 8	Среднее значение
$\alpha U_{\text{оп}}$	ppm/ °C	80,937*	81,474*	81,412*	80,513*	80,877*	75,925*	90,799*	86,496*	82,30413*

Значения параметра $\alpha U_{\text{оп}}$ образцов опытных образцов микросхемы не соответствуют нормам и уступают зарубежному аналогу LM385-2.5. Найдем температурную зависимость опорного напряжения в диапазоне температур от –60 до 125 °С для всех исследуемых образцов (рис. 5).

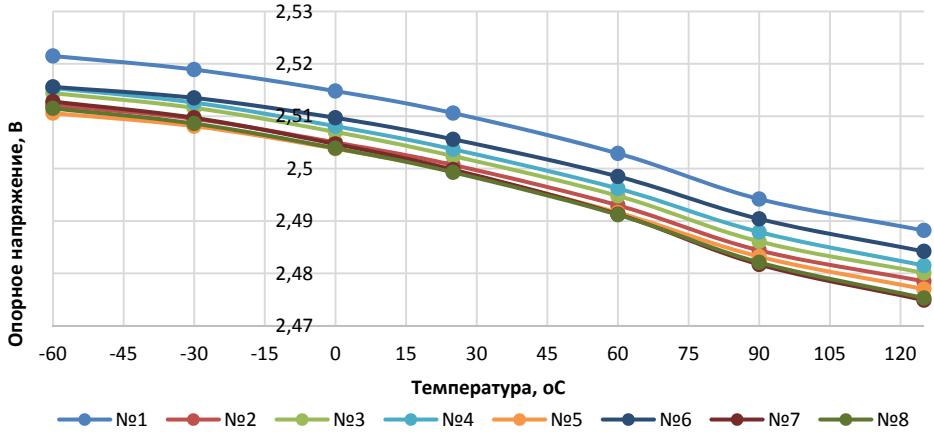


Рис. 5. Графики зависимости $U_{\text{оп}}(T)$

Заключение. В ходе работы были измерены параметры ИОН. Опытные образцы ИОН на 1,23 В соответствуют нормам и не уступают зарубежному аналогу LM385-1.2 по всем приведенным параметрам. Следовательно, нормы выбраны корректно. Опытные образцы ИОН на 2,5 В не соответствуют нормам и уступают зарубежному аналогу LM385-2.5 по следующим параметрам: $I_{\text{мин}}$ и $\alpha U_{\text{оп}}$. Следовательно, нормы должны быть изменены.

Список источников

[1] Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. *Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies.* Wiley-IEEE Press, 2009, 624 p.

[2] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices.*Technologies*, 2024, vol.12, art. no. 102(1-10).

[3] Kuznetsov V.V. HBM, MM, and CBM ESD Ratings Correlation Hypothesis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 1, art. no. 107.

[4] ГОСТ 18986.15–75. *Стабилитроны полупроводниковые. Метод измерения напряжения стабилизации.* Москва, ИПК Изд-во стандартов, 1977, 4 с.

[5] ГОСТ 19799–74. *Микросхемы интегральные аналоговые. Методы измерения электрических параметров и определения характеристик.* Москва, ИПК Изд-во стандартов, 1976, 45 с.

[6] ГОСТ 18986.17–73. *Стабилитроны полупроводниковые. Метод измерения температурного коэффициента напряжения стабилизации.* Москва, ИПК Изд-во стандартов, 1974, 5 с.

Investigation of the reference voltage source microcircuit

Kuzin Matvey Maksimovich matvey.kuzin.17@mail.ru
Andreev Dmitry Vladimirovich dmitrii_andreev@bmstu.ru
Lykov Dmitry Anatolyevich lykov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper examines prototypes of a domestic reference voltage source (RFS) microcircuit in two versions at 1.23 V and 2.5 V. A description of the microcircuit is given. The compliance of the RFS parameters (reference voltage, minimum operating current, change of reference voltage when the operating current changes) with the assumed (approximate) standards has been experimentally investigated. The temperature dependences of the reference voltage in the temperature range from minus 60 °C to 125 °C. The investigated microcircuit is compared with the foreign equivalent of the LM385.

Keywords: *reference-voltage source, RFS, minimum operating current, temperature coefficient*

УДК 539.232

Механизмы деградации диэлектрических пленок при электростатическом разряде

Платошин Владимир Олегович platoshinvo@student.bmstu.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследованы механизмы деградации диэлектрических пленок в МДП приборах при воздействии электростатического разряда (ЭСР). Подробно рассмотрены физические процессы: термическое разрушение, ионизация, электромиграция и механические напряжения, развивающиеся за наносекунды. Проанализированы ключевые факторы деградации — энергия и длительность импульса, толщина и материал пленки, геометрия структуры и внешние условия. Описаны экспериментальные признаки повреждений: рост тока утечки, снижение пробивного напряжения, оптические и спектральные изменения. Представлены перспективные методы повышения устойчивости диэлектриков и обозначены направления дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: *электростатический разряд, деградация диэлектрических пленок, МДП-приборы, механизм разрушения диэлектриков, устойчивость диэлектриков*

В мире микроэлектроники даже мимолетный всплеск энергии способен оставить неизгладимый след. Электростатический разряд (ЭСР) — явление, с которым можно столкнуться в повседневной жизни (например, при прикосновении к дверной ручке зимой), — в миниатюрных структурах МДП приборов может нанести существенный вред. Тончайшие диэлектрические пленки, призванные надежно изолировать элементы схемы, под ударом ЭСР начинают разрушаться и деградировать [1].

Процессы, протекающие при электростатическом разряде. Импульс тока в несколько ампер длится всего несколько наносекунд. При этом напряженность электрического поля достигает колоссальных значений: $E \sim 10^8$–10^9 В/м. Именно так выглядит электростатический разряд в микромасштабе. Когда эта энергия врезается в диэлектрическую пленку, запускается каскад процессов, каждый из которых вносит свой вклад в постепенное разрушение материала.

Сначала происходит резкое повышение температуры. Локальные зоны нагреваются до значений, превышающих 1000 °С, — достаточно, чтобы расплавить и даже испарить часть материала. Если в макромире такой перегрев вызвал бы заметное изменение объекта, то здесь все происходит на уровне нанометров: возникают микропоры, трещины, неоднородности, которые впоследствии станут слабыми местами структуры [2].

Затем начинает действовать ионизационное излучение. Под действием мощного поля атомы кристаллической решетки теряют электроны, порождая

большое количестве электронно-дырочных пар. Образуется нечто вроде плазменного канала, искажающего внутреннее электрическое поле.

Также вносит вклад в процесс разрушения и деградации электромиграция. Горячие электроны, инжектированные из электрода или полупроводника, проникают в объем диэлектрика и застревают в ловушках. Со временем эти заряженные области формируют проводящие филаменты — структуры, которые постепенно превращают изолятор в проводник. Вследствие перечисленных воздействий возникают механические напряжения. Резкий температурный градиент вызывает термоупругие деформации. Пленка может отслоиться от подложки, а в поликристаллических материалах трещины начнут распространяться по границам зерен.

Ключевые факторы деградации. Ключевые факторы деградации, которыми обусловлено, почему одни диэлектрические пленки выдерживают ЭСР, а другие разрушаются при меньшем воздействии [3].

Энергия разряда — первостепенный параметр. Для типичного диоксида кремния (SiO_2) толщиной 10–100 нм критическая энергия составляет всего 0,1−1 мДж. Превышение этого порога ведет к пробою. Но даже если разряд не пробивает пленку насквозь, он может оставить скрытые дефекты, которые проявятся позже.

Длительность импульса определяет характер повреждений. Короткие импульсы (<10 нс) вызывают локальный перегрев, не успевая распространить тепло по объему. Длинные (>100 нс) дают теплу время проникнуть глубже, провоцируя масштабные механические разрушения.

Толщина диэлектрика играет двойственную роль. Тонкие пленки (< 50 нм) более уязвимы к пробою из-за высокого поля $E = U/d$. В толстых (> 200 нм) доминируют объемные дефекты и термические напряжения, но порог пробоя выше.

Материал диэлектрика задает основные характеристики пленки. SiO_2 отличается высокой термической стабильностью, но склонен к образованию ловушек. HfO_2 и Al_2O_3 имеют большую диэлектрическую проницаемость, но уступают в термостойкости. Полимерные диэлектрики, хоть и гибче, но легче карбонизируются под действием разряда.

Геометрия структуры нередко становится слабым местом пленки. Острые края электродов усиливают локальное поле по принципу острия, а неоднородности толщины создают точки инициации пробоя. Даже микроскопические дефекты могут сыграть роль катализатора разрушения.

Наконец, внешние условия — температура и влажность — способны снизить порог пробоя на 10–20 %. Влажная среда ускоряет электрохимическую коррозию на границах раздела, а нагрев делает материал более податливым к повреждениям.

Для предотвращения использования поврежденных пленок и изучения процессов деградации полезно знать основные признаки ЭРС.

После ЭСР диэлектрическая пленка редко остается без видимых повреждений. Их можно увидеть и измерить:

– ток утечки вырастает на порядки: с 10^{-12} до 10^{-6} А;

– пробивное напряжение падает на 30–50 %, сигнализируя о накоплении внутренних дефектов;

– емкость меняется из-за локальных нарушений диэлектрической проницаемости;

– оптические дефекты — темные пятна, микротрещины — выявляются с помощью атомно силовой микроскопии (АСМ) или оптической микроскопии;

– спектральные сдвиги в ИК- и Раман-спектрах указывают на нарушение стехиометрии: например, появление связей Si−Si, которых в идеальном SiO_2 быть не должно.

Понимание механизмов деградации открывает пути к созданию более устойчивых структур.

На уровне конструкции помогают [4]:

– экранирование чувствительных узлов;

– защитные диоды и резисторы, гасящие энергию разряда;

– скругление краев электродов, снижающее локальные поля.

В выборе материалов перспективны [5]:

– композитные диэлектрики (например, SiO_2/HfO_2), сочетающие прочность и высокую проницаемость;

– слои с повышенной теплопроводностью, отводящие тепло от горячих точек.

Технологические приемы тоже играют роль:

– отжиг после нанесения пленки уменьшает количество дефектов;

– гидрофобные покрытия защищают от влаги, замедляя электрохимическую деградацию.

Деградация диэлектриков под действием ЭСР — не просто набор физических процессов, а сложная проблема на нанометровом уровне, где каждый фактор — температура, поле, материал — влияет на финальное качество. Сегодня исследователи стоят перед вызовами:

– понять динамику формирования проводящих каналов в ультратонких пленках;

– оценить, как циклические разряды накапливают повреждения;

– разработать методы in-situ диагностики, позволяющие «видеть» деградацию в реальном времени.

Решение этих задач позволит сделать МДП-структуры надежнее и мощнее.

Заключение. В статье проанализированы механизмы деградации диэлектрических пленок в МДП‑приборах под воздействием электростатического разряда. Рассмотрены ключевые физические процессы (термическое разрушение, ионизация, электромиграция) и факторы, влияющие на степень повреждений. Осуществлен обзор диагностических признаков деградации и методов повышения устойчивости диэлектриков. Определены перспективные направления дальнейших исследований в данной области.

Список источников

[1] Kuznetsov V.V. HBM, MM, and CBM ESD Ratings Correlation Hypothesis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 1, art. no. 107. https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2700492

[2] Кузнецов В.В., Андреев В.В. Установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. *Приборы и техника эксперимента*, 2024, № 2, с. 64–69. https://doi.org/10.31857/S0032816224020087

[3] Семкин Н.Д. Регистрация электростатических разрядов на борту космических аппаратов «Ресурс-П». *Приборы и техника эксперимента*, 2017, № 2, с. 110–116.

[4] Du F. An Enhanced Gate-Grounded NMOSFET for Robust ESD Applications. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, vol. 40, no. 9, pp. 1491–1494. https://doi.org/ 10.1109/led.2019.2926103

[5] Андреев В.В., Жалнин В.П., Столяров А.А. *Физические основы микро- и наноэлектроники.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 292 с.

Mechanisms of degradation of dielectric films during electrostatic discharge

Platoshin Vladimir Olegovich platoshinvo@student.bmstu.ru
Andreev Vladimir Viktorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article examines the mechanisms of degradation of dielectric films in MDP devices under the influence of electrostatic discharge (ESD). Physical processes are considered in detail: thermal destruction, ionization, electromigration, and mechanical stresses that develop in nanoseconds. The key degradation factors, such as pulse energy and duration, film thickness and material, structure geometry, and external conditions, are analyzed. Experimental signs of damage are described: an increase in leakage current, a decrease in breakdown voltage, optical and spectral changes. Promising methods for increasing the stability of dielectrics are presented and directions for further research in this area are outlined.

Keywords: *electrostatic discharge, degradation of dielectric films, MDP devices, mechanism of destruction of dielectrics, stability of dielectrics*

УДК 621.377.623.22

Применение технологии NAND Flash в системах хранения данных

Карнюхин Антон Сергеевич antonii.k.2003@gmail.com
Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Лыков Дмитрий Анатольевич lykov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследовано применение технологии NAND Flash как доминирующей платформы для систем хранения данных. Рассмотрена эволюция технологии от planar к 3D NAND и ее влияние на ключевые параметры: скорость доступа, емкость и цену за гигабайт. Проанализированы архитектурные решения, позволяющие нивелировать inherent limitations технологии, такие как выравнивание износа и коррекция ошибок. Показано, что, несмотря на растущую конкуренцию со стороны новых типов памяти, NAND Flash сохранит лидирующие позиции в сегментах от мобильных устройств до центров обработки данных в среднесрочной перспективе благодаря непрерывному совершенствованию и оптимизации стоимости.

Ключевые слова: *NAND Flash, 3D NAND, системы хранения, энергонезависимая память, выравнивание износа, перспективы развития*

Экспоненциальный рост объемов данных в современных вычислительных системах обусловил ужесточение требований к подсистемам хранения информации. В условиях исчерпания потенциала традиционных накопителей на жестких магнитных дисках, ограниченных механической природой функционирования, доминирующей технологией стала NAND Flash. Ее широкое внедрение обусловлено преимуществами энергонезависимости, высокой производительности операций ввода-вывода и устойчивости к внешним воздействиям.

Несмотря на технологические преимущества, эксплуатация NAND Flash-памяти сопряжена с фундаментальными ограничениями, включая детерминированный ресурс циклов записи-стирания и прогрессирующую деградацию ячеек памяти. В связи с этим, актуальным представляется комплексный анализ применения данной технологии в системах хранения данных. Цель исследования — систематизация областей применения NAND Flash, оценка эксплуатационных характеристик и перспектив развития архитектуры, включая переход к трехмерной компоновке (3D NAND) и многоуровневому хранению заряда (QLC).

Принцип работы NAND Flash-памяти. В основе технологии лежит транзистор с плавающим затвором, показанный на рис. 1, изолированный слоем диэлектрика. Накопление электрического заряда на этом затворе изменяет пороговое напряжение транзистора, что интерпретируется как логическое состояние ячейки [1].

Ячейки объединены в страницы (минимальная единица чтения/записи, обычно 4–16 КБ), которые, в свою очередь, сгруппированы в блоки (мини-

мальная единица стирания, обычно 128–512 страниц). Такая архитектура, показанная на рис. 2, определяет ключевую особенность NAND — работу с блоками, а не с отдельными байтами [2].

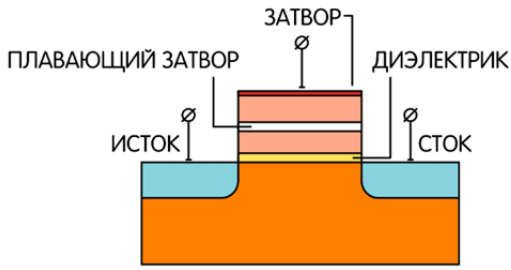


Рис. 1. Транзистор с плавающим затвором

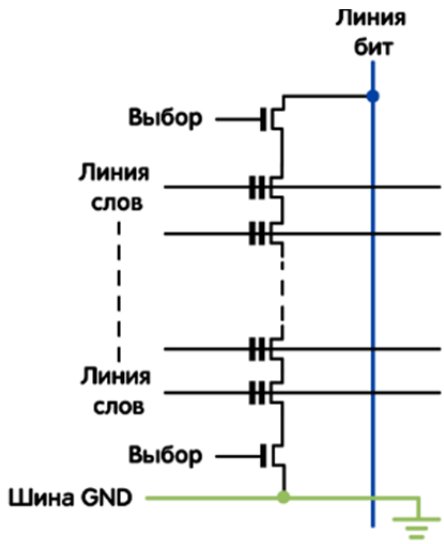


Рис. 2. Схематичный способ построения матрицы NAND

Повышение плотности хранения в NAND-памяти достигается не только за счет масштабирования [3], но и благодаря реализации многоуровневого кодирования в ячейках. Физической основой для этого служит аналоговая природа транзистора с плавающим затвором, который способен находиться в ряде стабильных состояний с различной проводимостью канала «сток-исток». Каждое такое состояние соответствует определенному уровню порогового напряжения, задаваемого количеством инжектированных в плавающий затвор (или в ловушку зарядов в структурах 3D NAND) электронов [4].

Операция считывания заключается в подаче опорного напряжения и детектировании силы тока, что позволяет однозначно определить запрограммированное состояние ячейки. Данный принцип позволяет хранить в одной физической ячейке несколько битов информации. В настоящее время широко распространены ячейки с емкостью до четырех бит, хотя перспективные исследования, включая демонстрацию пятибитных ячеек компанией Toshiba, указывают на потенциал дальнейшего роста. Таким образом, по количеству хранимых бит ячейки памяти подразделяются на два основных типа: SLC (Single-Level Cell) с двумя состояниями и MLC (Multi-Level Cell) с множественными состояниями.

Функционирование NAND-памяти основано на трех фундаментальных операциях: записи, стирании и чтении. Операция записи (Program) осуществляется путем инжекции электронов на плавающий затвор через туннельный оксид методом Фаулера — Нордхейма, что достигается приложением высокого напряжения к управляющему затвору. Накопление заряда переводит ячейку в состояние, интерпретируемое как логический «0». Операция стирания (Erase), в отличие от записи, выполняется на уровне целых блоков и заключается в удалении электронов с плавающего затвора за счет приложения напряжения обратной полярности, что возвращает ячейку в состояние логической «1». Операция чтения (Read) производится подачей опорного напряжения на управляющий затвор; пороговое напряжение транзистора, определяемое зарядом на плавающем затворе, модулирует ток стока, что позволяет детектировать сохраненное состояние («1» или «0»).

Управление NAND Flash-памятью, характеризующейся асимметричностью операций доступа, возлагается на специализированный контроллер, который реализует комплекс алгоритмов, обеспечивающих надежность, производительность и долговечность устройства [5]. Ключевые функции контроллера включают следующее.

1. Слой трансляции флеш-адресов (Flash Translation Layer, FTL). Фундаментальное ограничение NAND Flash, заключающееся в невозможности прямого перезаписывания данных на физическом уровне (поскольку запись производится постранично, а стирание — поблочно), преодолевается с помощью механизма FTL. Данный механизм выполняет динамическое отображение статических логических адресов, предоставляемых хост-системой, на изменяющиеся физические адреса в памяти. Эта абстракция эмулирует работу с памятью с произвольным доступом, маскируя от вышестоящей системы архитектурные особенности NAND.

2. Алгоритмы выравнивания износа (Wear Leveling). Ограниченный ресурс циклов стирания-записи (P/E cycles) ячеек памяти требует его равномерного распределения. Контроллер осуществляет мониторинг счетчиков циклов для каждого физического блока и реализует стратегии динамического распределения данных, направленные на минимизацию дисбаланса в их использовании. Эффективное выравнивание износа является критическим фактором, определяющим срок службы накопителя.

3. Коррекция ошибок (Error Correction Code, ECC). Вследствие физических свойств полупроводниковой структуры и деградации ячеек в процессе эксплуатации, в NAND-памяти неизбежно возникновение битовых ошибок. Для борьбы с ними контроллер использует аппаратные модули ECC, которые генерируют и присоединяют корректирующие коды к каждой записываемой странице данных. При последующем считывании эти коды позволяют детектировать и исправлять ошибки. Следует отметить, что с увеличением уровней заряда на ячейку (TLC, QLC) и ростом плотности размещения данных, требования к корректирующей способности ECC неуклонно возрастают.

4. Сборка мусора (Garbage Collection). В результате постоянного обновления данных в пространстве флеш-памяти накапливаются неактуальные («невалидные») страницы. Фоновый процесс сборки мусора отвечает за идентификацию таких страниц в пределах блоков, перенос актуальных («валидных») данных в новые местоположения и подготовку целых блоков к операции стирания для их последующего повторного использования. Эффективность данного процесса напрямую влияет на производительность записи.

5. Управление дефектными блоками (Bad Block Management). Наличие дефектных блоков, как изначально присутствующих после производства, так и возникающих в течение жизненного цикла устройства, является неотъемлемой особенностью NAND Flash. Контроллер поддерживает список дефектных блоков и выполняет их изоляцию, исключая их из адресного пространства, доступного для операций записи и хранения данных, что обеспечивает сохранность информации.

Заключение. Проведенное исследование позволило всесторонне проанализировать применение технологии NAND Flash в современных системах хранения данных и сформулировать следующие выводы.

Технология NAND Flash утвердилась в качестве доминирующей платформы для систем хранения различных классов — от мобильных устройств до центров обработки данных. Это обусловлено ее ключевыми преимуществами: высокой производительностью операций ввода-вывода, компактностью, низким энергопотреблением и постоянно снижающейся стоимостью хранения единицы данных.

В ходе работы были систематизированы фундаментальные ограничения технологии, включая детерминированный ресурс циклов записи-стирания, необходимость блочного стирания и деградацию ячеек памяти. Показано, что эти ограничения успешно нивелируются сложными алгоритмами контроллера, такими как выравнивание износа, сборка мусора и коррекция ошибок.

Список источников

[1] Cai Y., Haratsch E. F., Mutlu O., Mai K. Error Patterns in MLC NAND Flash Memory: Measurement, Characterization, and Analysis. *Proceedings of the IEEE International Test Conference (ITC),* 2012. https://doi.org/10.1109/TEST.2012.6401561

[2] Grupp L.M., Caulfield A.M., Coburn J., Swanson S., Yaakobi E., Siegel P.H., Wolf J.K. Characterizing Flash Memory: Anomalies, Observations, and Applications. *IEEE International Symposium on Microarchitecture (MICRO)*, 2009. https://doi.org/10.1109/MICRO.2009.10

[3] Micheloni R., Crippa L., Marelli A. *Inside NAND Flash Memories*. Springer, 2010. 573 p.

[4] Yang J., Lee J.-S. Review and Prospect of 3D NAND Flash Memory. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 1–12. https://doi.org/10.5573/jsts.2019.19.1.001

[5] Numonyx. *Understanding the Flash Translation Layer (FTL) Specification*. White Paper, 2010, 20 p.

Application of NAND Flash technology in data storage systems

Karnyukhin Anton Sergeevich antonii.k.2003@gmail.com
Kuznetsov Vadim Vadimovich vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Lykov Dmitry Anatolyevich lykov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article explores the use of NAND Flash technology as the dominant platform for data storage systems. The evolution of the technology from planar to 3D NAND and its impact on key parameters are considered: access speed, capacity, and price per gigabyte. The architectural solutions that make it possible to eliminate inherent limitations of technology, such as wear leveling and error correction, are analyzed. It is shown that despite the growing competition from new types of memory, NAND Flash will maintain its leading position in segments from mobile devices to data centers in the medium term due to continuous improvement and cost optimization.

Keywords: *NAND Flash, 3D NAND, storage systems, non-volatile memory, wear leveling, development prospects*

УДК 621.396.6

Анализ и методы подавления помех в цепях смешанных сигналов

Самофалов Владислав Геннадьевич vlald.sm@mail.ru
Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Полпудников Сергей Викторович polpud@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлены основные источники шумов в схемах со смешанными сигналами, сочетающих аналоговые и цифровые компоненты. Описаны механизмы возникновения кондуктивных и излучаемых помех, перекрестных наводок и джиттера тактовых сигналов. Рассмотрены эффективные подходы к подавлению шумов, включая топологические, схемотехнические и системные решения. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие снижение уровня помех на 15–20 дБ при применении предложенных методов. Особое внимание уделено вопросам заземления и развязки компонентов в многоплатных системах.

Ключевые слова: *смешанные сигналы, шумы, целостность сигнала, электромагнитная совместимость (ЭМС), заземление, развязка, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)*

Современные электронные системы все чаще представляют собой сложные устройства, содержащие как аналоговые, так и цифровые компоненты на одной плате или даже в одной микросхеме. Развитие микроэлектроники и рост степени интеграции привели к широкому распространению систем на кристалле (SoC), в которых высокоточные аналоговые тракты и быстродействующие цифровые процессоры размещены в непосредственной близости. Такая интеграция создает серьезные проблемы, связанные с взаимным влиянием узлов, среди которых доминирующей является проблема шумов [1].

Особую актуальность проблема подавления шумов приобретает в высокопроизводительных системах сбора и обработки данных, где цифровые переключающие цепи генерируют широкополосные помехи, способные существенно ухудшать динамические характеристики чувствительных аналоговых трактов. Традиционные методы проектирования, эффективные для чисто аналоговых или цифровых систем, часто оказываются недостаточными для устройств со смешанными сигналами.

Целью данной работы является систематизация основных источников шумов в смешанных схемах, анализ механизмов их распространения и разработка комплексного подхода к подавлению помех на различных этапах проектирования.

Источники шумов в схемах со смешанными сигналами. Ключевыми источниками шумов в устройствах со смешанными сигналами являются:

– цифровые переключения: быстрые фронты сигналов в цифровых блоках вызывают импульсные броски тока через шины питания и земли, что

приводит к возникновению кондуктивных и излучаемых помех. Как показано в работе [2], ток переключения со скоростью 10 мА/нс, протекающий через проводник с индуктивностью 20 нГн/дюйм, создает импульс напряжения 200 мВ, что составляет 10 % от размаха сигнала 2 В и эквивалентно потере 3,5 разрядов точности;

– перекрестные помехи (Crosstalk): электромагнитная связь между соседними проводниками на кристалле или печатной плате приводит к наведению паразитных сигналов. Емкостная и индуктивная связь усиливается с ростом частоты и уменьшением расстояния между проводниками;

– джиттер тактовых сигналов: нестабильность тактового сигнала напрямую влияет на динамические характеристики АЦП и ЦАП, увеличивая шум квантования и искажая форму выходного сигнала. Для Σ-Δ АЦП с высоким коэффициентом передискретизации даже незначительный джиттер тактового генератора может существенно ухудшить отношение сигнал/шум системы [3];

– общий импеданс земли: наличие общего сопротивления в цепях возвратного тока аналоговой и цифровой частей схемы приводит к модуляции опорного потенциала и появлению помех в аналоговых трактах (рис. 1).

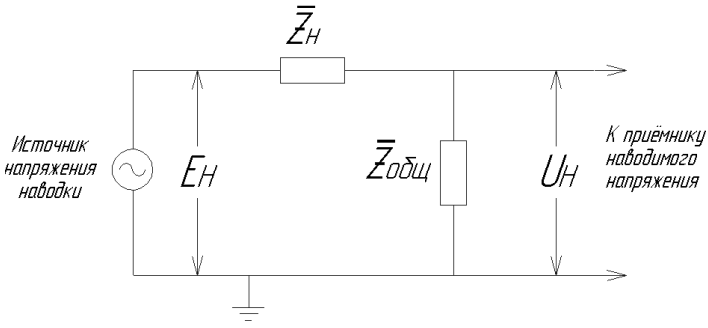


Рис. 1. Модель связи через общий импеданс земли

Методы анализа шумовых характеристик. Для анализа шумовых характеристик смешанных систем используются как специализированные программы моделирования (Cadence Virtuoso, ADS, Altium Designer), так и экспериментальные методы. Компьютерное моделирование позволяет прогнозировать целостность сигналов на этапе проектирования, анализировать импеданс цепей питания и заземления, выявлять потенциальные проблемы электромагнитной совместимости.

Экспериментальные методы включают:

– измерение спектра помех с помощью векторного анализатора цепей;

– анализ целостности сигналов с помощью осциллографов с высокой полосой пропускания;

– исследование импеданса цепей питания с использованием анализатора цепей;

– термоэмиссионный анализ для выявления участков с повышенным тепловыделением.

Подходы к подавлению шумов. Обеспечение низкоимпедансных заземляющих поверхностей большой площади является критически важным для всех современных аналоговых схем. Заземляющая поверхность действует не только как низкоимпедансный обратный путь для развязки высокочастотных токов, но также минимизирует электромагнитные радиочастотные помехи [2].

В системах со смешанными сигналами с большим числом цифровых схем целесообразно физически отделять чувствительные аналоговые компоненты от шумных цифровых компонентов и использовать раздельные заземляющие поверхности (рис. 2). Эти поверхности не должны перекрываться, чтобы минимизировать емкостную связь между ними.

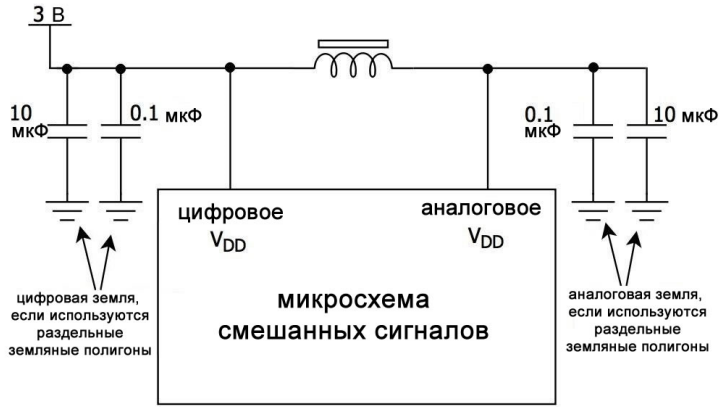


Рис. 2. Разделение аналоговой и цифровой заземляющих поверхностей

Выводы питания должны быть развязаны прямо на заземляющую поверхность с помощью низкоиндуктивных керамических конденсаторов для поверхностного монтажа. Керамические конденсаторы должны быть расположены как можно ближе к выводам питания микросхемы. Для дополнительной развязки могут также потребоваться ферритовые бусины.

Топологические методы. Каждая печатная плата в системе должна иметь хотя бы один слой, полностью отведенный под заземляющую поверхность. В идеальной 4-слойной плате два внутренних слоя используются для заземляющей поверхности и поверхности питания, а два внешних слоя — для выполнения соединений между установленными компонентами [4].

При проектировании печатной платы следует:

– разделять аналоговые и цифровые участки схемы;

– минимизировать длину параллельных трасс, несущих чувствительные сигналы;

– использовать экранирование для критичных аналоговых трактов;

– обеспечивать не менее 75 % площади слоя для заземляющей поверхности в двусторонних платах.

Схемотехнические методы. К эффективным схемотехническим методам подавления шумов относятся:

– применение дифференциальных сигналов в аналоговых трактах [5];

– использование фильтров на шинах питания (LDO-стабилизаторы, RC-фильтры) [6];

– внедрение буферных регистров для изоляции цифровых выходов преобразователей от шумной шины данных;

– последовательное включение резисторов для ограничения токов переключения;

– использование отдельных источников питания для аналоговой и цифровой частей схемы.

Результаты моделирования. Для оценки эффективности методов подавления шумов было проведено моделирование работы 16-разрядного АЦП в присутствии активного цифрового ядра. Исследовалось влияние различных подходов к заземлению и развязке на уровень помех в аналоговом тракте.

На рис. 3 показаны спектры выходного сигнала АЦП без применения защитных мер и с использованием выделенного аналогового источника питания, RC-фильтрации и оптимизированной топологии заземления.

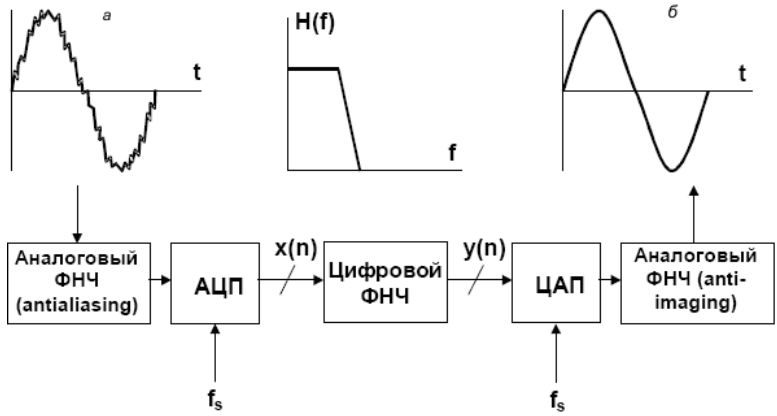


Рис. 3. Спектр выходного сигнала АЦП:
а — без подавления шумов; *b* — с применением методов подавления

Как видно из графиков, предложенные методы позволяют снизить уровень гармонических составляющих и широкополосного шума на 15–20 дБ, что эквивалентно увеличению динамического диапазона приблизительно на 3–4 бита.

Дополнительно было исследовано влияние фазового шума тактового генератора на отношение сигнал/шум системы. При среднеквадратичном зна-

чении джиттера 50 пс и частоте аналогового сигнала 100 кГц отношение сигнал/шум составило 90 дБ, что соответствует 15-разрядному динамическому диапазону. Уменьшение джиттера до 5 пс позволило улучшить отношение сигнал/шум до 110 дБ [7].

Заключение. Проблема шумов в схемах со смешанными сигналами является критичной для достижения высоких эксплуатационных характеристик современных электронных устройств. Проведенный анализ показал, что для ее успешного решения необходим комплексный подход, включающий корректное топологическое проектирование, применение специализированных схемотехнических решений и тщательное моделирование на всех этапах разработки.

Наиболее эффективными методами подавления шумов являются:

– использование низкоимпедансных заземляющих поверхностей большой площади;

– физическое и электрическое разделение аналоговых и цифровых цепей;

– применение многослойных печатных плат с выделенными слоями заземления и питания;

– тщательная развязка цепей питания и использование буферных элементов [8];

– минимизация джиттера тактовых сигналов с помощью высококачественных генераторов.

Использование описанных методов позволяет существенно повысить помехоустойчивость и целостность сигналов, что является залогом создания надежных и высокопроизводительных систем следующего поколения.

Список источников нет ссылок в тексте на пункты 5-8

[1] Kester W., Bryant J., Byrne M. *Grounding in Mixed Signal Systems*. Analog Devices, Hardware Design Techniques, 2004, 35 p.

[2] Кузнецов В.В., Андреев В.В. Установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. *Приборы и техника эксперимента*, 2024, № 2, с. 64–69.

[3] Baker R.J. *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation*. Wiley-IEEE Press, 2019, 1296 p.

[4] Johnson H., Graham M. *High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic*. Prentice Hall, 1993, 447 p.

[5] Razavi B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. McGraw-Hill Education, 2016, 720 p.

[6] Pandit S., Mandal C., Patnaik A. Power Supply Noise Suppression in Mixed-Signal ICs Using Active Filtering Techniques. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Seville, Spain, 2020, pp. 1–5.

[7] Liu X. et al. A Comprehensive Study of Substrate Noise Isolation Techniques for Mixed-Signal SoCs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, vol. 68, no. 4, pp. 1895–1902.

[8] IEEE STD 1057–2017. *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders*. IEEE, 2017.

Analysis and methods of noise suppression in mixed-signal circuits

Samofalov Vladislav Gennadievich vlald.sm@mail.ru
Kuznetsov Vadim Vadimovich vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Polpudnikov Sergey Viktorovich polpud@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article discusses the main sources of noise in mixed-signal circuits combining analog and digital components. The mechanisms of conductive and radiated interference, crosstalk, and clock jitter are analyzed. Modern methodologies for modeling noise characteristics and experimental measurement of signal integrity parameters are presented. Effective approaches to noise suppression are described in detail, including topological, circuit and system solutions. Simulation results demonstrating a 15–20 dB reduction in noise levels when using the proposed methods are presented. Particular attention is paid to grounding and decoupling issues in multi-board systems.

Keywords: *mixed signals, noise, signal integrity, electromagnetic compatibility (EMC), grounding, decoupling, analog-to-digital converters (ADC), digital-to-analog converters (DAC)*

УДК 621.314.1

Анализ и оптимизация компонентной базы повышающего DC–DC преобразователя на основе схемотехнического моделирования в QUCS-S

Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Лукашов Дмитрий Игоревич dimitriluckashov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен комплексный анализ и методика оптимизации компонентной базы повышающего DC–DC преобразователя на основе схемотехнического моделирования переходных процессов в среде QUCS-S. Проведено детальное исследование влияния параметров ключевых компонентов на энергетическую эффективность, стабильность выходных характеристик и динамические показатели схемы. На основе анализа переходных процессов предложены конкретные решения по оптимизации параметров силового ключа, выпрямительного диода, накопительного дросселя и выходного фильтра. Показано повышение КПД преобразователя с 76 до 84 %.

Ключевые слова: *повышающий преобразователь, QUCS-S, моделирование переходных процессов, оптимизация компонентов, КПД, пульсации, силовая электроника, MOSFET, выпрямительный диод*

Повышающие DC–DC преобразователи занимают важное место в современной силовой электронике, обеспечивая преобразование напряжения от низковольтных источников питания до повышенного потенциала, необходимого для работы различных электронных устройств. Эффективность и надежность таких преобразователей в значительной степени определяются корректным выбором компонентной базы, учитывающей как статические, так и динамические характеристики элементов. Не малую значимость представляет анализ переходных процессов, которые оказывают существенное влияние на энергетические показатели и стабильность работы преобразователя [1].

Целью данной работы является анализ и оптимизация компонентного состава повышающего преобразователя, представленного на рис. 1, на основе моделирования переходных процессов в QUCS-S. Задачами данного исследования являются: анализ работы силовой части преобразователя, оценка влияния параметров компонентов на КПД, исследование динамических характеристик и разработка рекомендаций по оптимизации элементной базы [2].

Методика исследования. Исследование проводилось методом компьютерного моделирования переходных процессов в среде QUCS-S. Моделирование выполнялось для штатной схемы преобразователя с последующим анализом влияния замены ключевых компонентов. Параметры моделирования были установлены следующие: время моделирования 500 мс, шаг интегрирования 5 мкс. Такой подход позволил получить детальную информацию

о динамических характеристиках преобразователя и идентифицировать ключевые точки для оптимизации (рис. 2) [3].

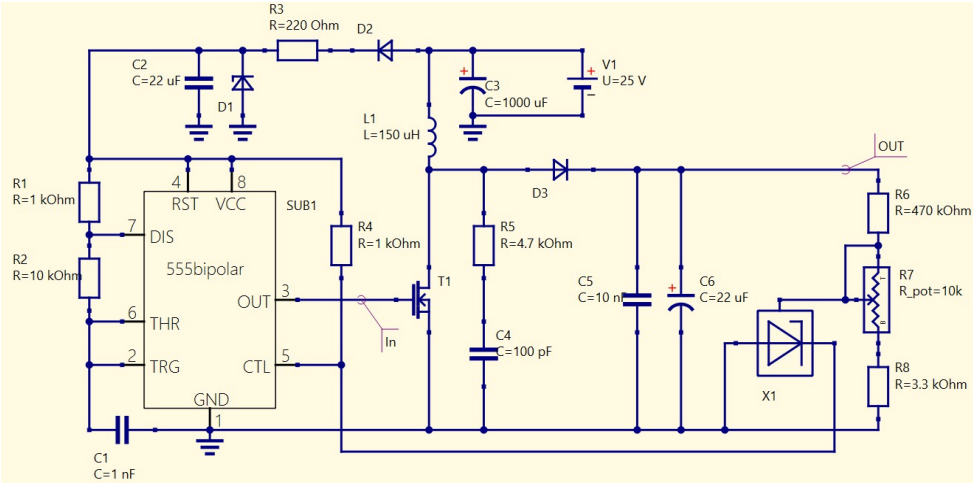


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемого повышающего DC–DC преобразователя

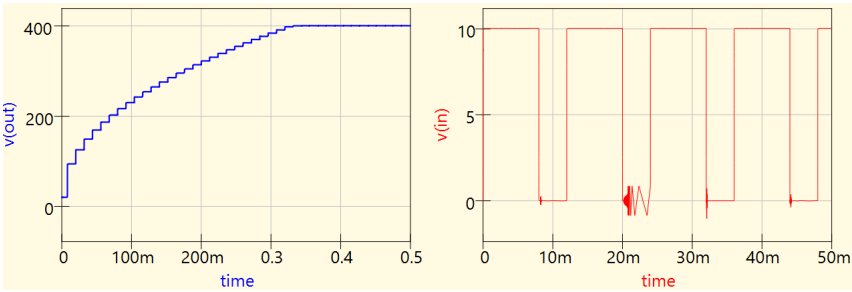


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов исходной схемы

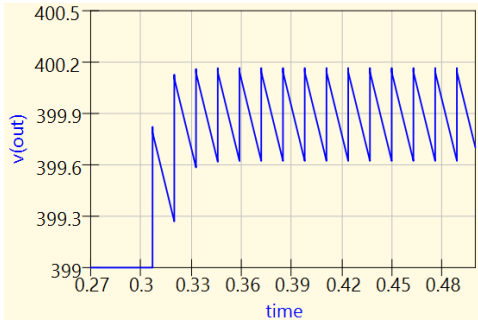


Рис. 3. Уровень пульсаций исходной схемы

Анализ компонентной базы и результаты моделирования. Анализ силовой части преобразователя начался с исследования работы MOSFET транзистора T1, моделирование проводилось с использованием транзистора IRF840. Анализ переходных процессов показал, что пиковое напряжение сток-исток достигает 400 В при максимальном токе стока 2,1 А. Исследование работы диода D3 (US1M) выявило прямое падение напряжения 0,85 В при обратном напряжении 310 В и мощности потерь 1,6 Вт.

Детальный анализ накопительных элементов показал, что дроссель L1 номиналом 150 мкГн демонстрирует ток пульсаций 0,4 А при токе насыщения 3,2 А и потерях в меди 0,35 Вт. Выходной конденсатор C7 емкостью 1000 мкФ обеспечивал пульсации напряжения 60 мВ при ESR 0,08 Ом (рис. 3). Особое внимание было уделено анализу цепи обратной связи, который показал, что выходное напряжение составляет 400 В при коэффициенте стабилизации 0,95 и времени установления 3,2 мс [4].

Оптимизация компонентной базы. На основе анализа переходных процессов были предложены конкретные решения по оптимизации компонентной базы, силовой ключ необходимо заменить на MOSFET STP8NM50, который позволяет снизить сопротивление открытого канала с 0,9 до 0,5 Ом, что обеспечивает снижение потерь проводимости примерно на 35 % и уменьшение мощности рассеяния до 1,8 Вт. Диод US1M необходимо заменить на MUR160, что позволит уменьшить прямое падение напряжения с 0,85 до 0,65 В и сократит время восстановления с 75 до 35 нс, обеспечивая снижение коммутационных потерь примерно на 25 % [5].

Также улучшение характеристик достигнуто за счет оптимизации входного фильтра путем увеличения емкости C3 до 2200 мкФ (рис. 4). Данная модификация позволила снизить пульсации напряжения с 60 до 30 мВ и улучшить стабильность входного напряжения (рис. 5). Дополнительно был оптимизирован состав выходного фильтра и параметры цепи обратной связи для обеспечения лучшей динамической реакции системы [3].

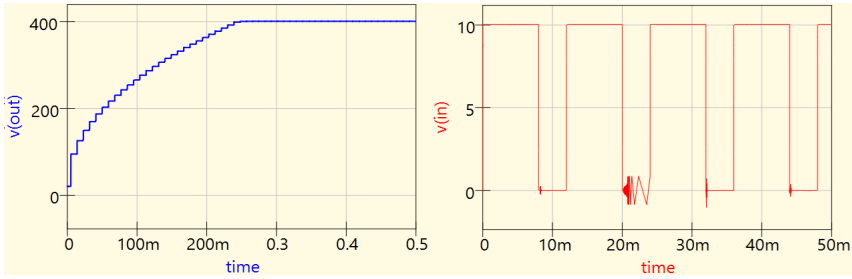


Рис. 4. Осциллограммы работы преобразователя после оптимизации

Результаты оптимизации. Сравнительный анализ переходных процессов до и после оптимизации показал значительное улучшение ключевых по-

казателей преобразователя. КПД увеличился с 76 до 84 %, что обусловлено снижением потерь в силовых компонентах. Пульсации входного напряжения уменьшились с 60 до 30 мВ, что свидетельствует об улучшении качества входного напряжения. Время установления выходного напряжения сократилось с 3,2 до 2,4 мс, что указывает на улучшение динамических характеристик преобразователя. Суммарная мощность потерь снизилась с 4,75 до 2,95 Вт, что также подтверждает эффективность предложенных решений.

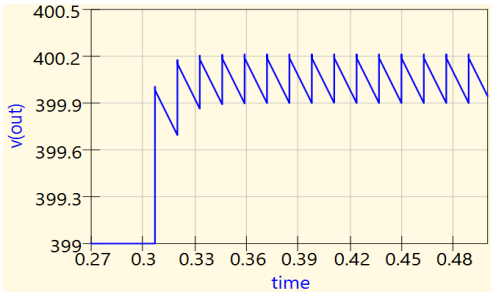


Рис. 5. Уровень пульсаций после оптимизации

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует эффективность использования моделирования переходных процессов в QUCS-S для анализа и оптимизации компонентной базы повышающих DC–DC преобразователей. Предложенные решения позволяют повысить КПД на 8 %, снизить пульсации выходного напряжения на 54 % и улучшить динамические характеристики преобразователя. Особую значимость имеет тот факт, что все оптимизации были предложены на основе анализа единственного типа моделирования — переходных процессов, что подтверждает эффективность выбранной методики исследования. Полученные результаты могут быть успешно использованы при проектировании аналогичных повышающих преобразователей и представляют практическую ценность для инженеров-разработчиков в области силовой электроники.

Список источников

[1] Коваленко В.М., Свито И.Л. *Преобразовательная техника. Курсовое проектирование.* Омск, ОмГУПС, 2014, с. 4–10.

[2] Кузнецов В.В. Моделирование высокочастотных схем в частотной области при помощи САПР Qucs. *Компоненты и технологии*, 2015, № 8, с. 120–126.

[3] Мэк Р. *Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению.* Москва, Додэка-XXI, 2011, с. 58–77.

[4] Кит С. *Силовая электроника. Руководство разработчика.* Москва, Додэка-XXI, 2011, с. 127–141.

[5] Сворень Р.А. *Электроника шаг за шагом: практическая энциклопедия радиолюбителя.* Москва, АСТ, 2020, с. 241–263.

Analysis and optimization of the component base of a step-up DC–DC converter based on circuit simulation in QUCS-S

Kuznetsov Vadim Vadimovich vadim.kuznetsov@bmstu.ru
Lukashov Dmitry Igorevich dimitriluckashov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article presents a comprehensive analysis and optimization methodology for a step-up DC–DC converter's component base using transient simulation in the QUCS-S environment. A detailed study is conducted of the influence of key component parameters on the energy efficiency, output stability, and dynamic performance of the circuit. Based on transient analysis, specific solutions are proposed for optimizing the parameters of the power switch, rectifier diode, storage inductor, and output filter. An increase in converter efficiency from 76 % to 84 % is demonstrated.

Keywords: *boost converter, QUCS-S, transient simulation, component optimization, efficiency, ripple, power electronics, MOSFET, rectifier diode*

УДК 621.317

Микросхема быстродействующего компаратора напряжения

Лыков Андрей Дмитриевич lyykovad@student.bmstu.ru
Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено устройство и принципы работы микросхемы быстродействующего компаратора напряжения. Представлена структурная схема, включающая входной дифференциальный каскад усиления, каскад усиления, дифференциальный каскад, стробирующие цепи и выходные каскады, обеспечивающие совместимость с уровнями ТТЛ. Показано, что применение технологии диодов Шоттки позволяет достичь малых времен задержки — порядка 26 нс при заданном высоком коэффициенте усиления. Сделаны выводы, что микросхема может использоваться в системах аналогово-цифрового преобразования, быстродействующих схемах сравнения и устройствах считывания памяти.

Ключевые слова: *интегральная микросхема, компаратора, структурная схема, каскады усиления, диоды Шоттки*

Быстродействующий компаратор напряжения представляет собой электронное устройство, предназначенное для сравнения двух аналоговых сигналов и формирования цифрового выходного уровня, соответствующего результату сравнения. В отличие от обычных операционных усилителей, компараторы обеспечивают минимальное время задержки переключения, что делает их незаменимыми в схемах, требующих высокой скорости отклика [1, 2].

Актуальность применения быстродействующих компараторов обусловлена стремительным развитием цифровых и смешанных систем обработки сигналов, где требуется точное и мгновенное определение перехода сигнала через заданный порог. Такие устройства широко используются в аналого-цифровых преобразователях, устройствах временного анализа, системах автоматического управления, радиотехнических и измерительных комплексах. Современные микросхемы сочетают высокую скорость с низким энергопотреблением и совместимостью с логическими уровнями ТТЛ, что позволяет эффективно интегрировать их в современные высокопроизводительные электронные системы.

Рассматриваемый быстродействующий компаратор напряжения — это высокоскоростной аналоговый компаратор напряжения, который впервые объединяет технологию диодов Шоттки с традиционным линейным процессом. Это позволяет изготавливать на одном кристалле как высокоскоростные ТТЛ-вентили, так и точный линейный усилитель. Компаратор имеет входной каскад с эмиттерным повторителем, обеспечивающий чрезвычайно малые входные токи. Это расширяет область применения аналоговых компараторов напряжения [3].

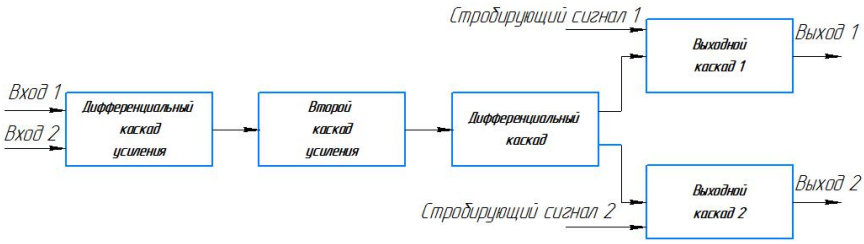


Рис. 1. Структурная схема микросхемы быстродействующего компаратора апряжения

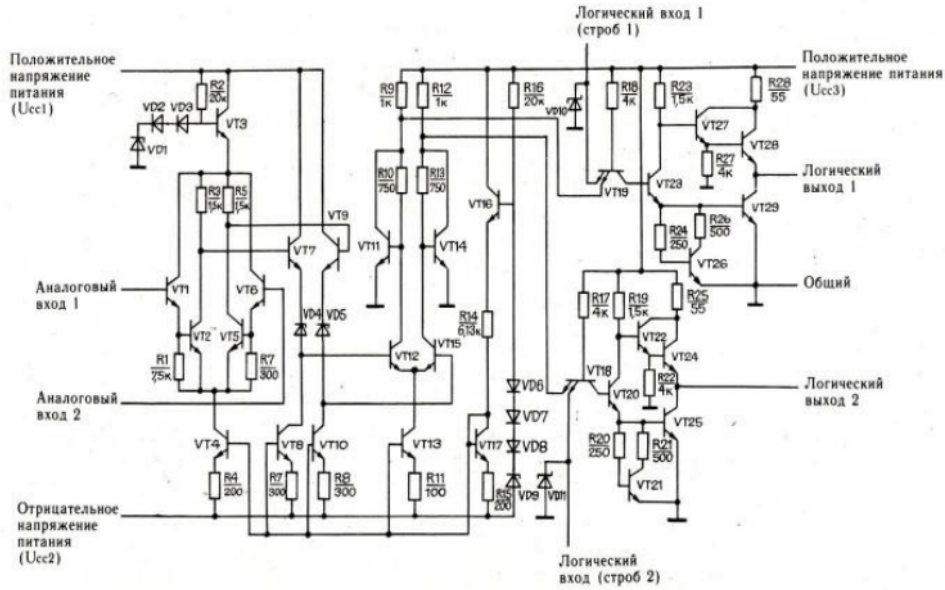


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная

Компаратор обладает большим входным сопротивлением (Rx = 500 кОм). Коэффициент усиления составляет 5000. Усилительные транзисторы схемы имеют структуру, снабженную диодами Шоттки [4]. Диоды Шоттки включаются параллельно переходу коллектор-база того транзистора, который не должен попасть в режим насыщения. Когда транзистор работает в активной области (усиливает сигнал в линейном режиме), то диод Шоттки имеет обратное смещение и не оказывает влияния на работу транзистора. Если напряжение коллектор-база транзистора снижается до 0,7 В, диод Шоттки отбирает за счет своего малого напряжения открывания (0,3–0,4 В) излишний ток перехода коллектор-база, поэтому классический режим насыщения транзистора не наступает, а в базовой области не накапливаются неосновные носители. Тем самым гарантируется наименьшее время выхода транзистора из насыщения, а следовательно время задержки выключения будет незначительным (< 26 нс).

Первый дифференциальный каскад усиления (транзисторы VT1, VT2, VT5, VT6) имеют входы с составными транзисторами, второй каскад (транзисторы VT7, VT9) снабжен стабилитронами сдвига уровня (диоды VD4, VD5). Последний дифференциальный каскад (транзисторы VT12, VT15) работает как инвертор: при переключении тока его генератора стабильного тока (транзистор VT13) включаются и выключаются выходные ТТЛ-ключи с переходами Шоттки. Второй вход каждого ключа используется для подачи сигналов стробирования.

Компаратор имеет вывод «Земля» и три вывода питания: через вывода подается питание (±10 В) на линейную часть, а также подводится напряжение +5,25 В для питания ТТЛ-ключей. Выходные двухполярные сигналы снимаются с двух выходов.

Диоды Шоттки в данной схеме используются для устранения насыщения транзисторов, позволяя им быстро переключиться между активным и отключенным режимом [5].

При снижении напряжения на базе до 0,7 В, диод Шоттки открывается при малом напряжении (0,3 В) и отбирает излишний ток, предотвращая насыщение транзистора. Благодаря этому происходит снижение времени выхода из насыщения транзистора, что обеспечивает очень высокую скорость переключения.

Заключение. В результате рассмотрения устройства и принципа работы микросхемы быстродействующего компаратора напряжения показано, что применение технологии диодов Шоттки в сочетании с традиционными дифференциальными каскадами позволяет значительно сократить время задержки переключения (до 26 нс) при сохранении высокого коэффициента усиления и совместимости с ТТЛ-уровнями. Разработанная структурная схема обеспечивает высокую точность, стабильность и помехоустойчивость работы, что делает такую микросхему эффективным решением для применения в системах аналогово-цифрового преобразования, быстродействующих схемах сравнения и устройствах считывания памяти. Таким образом, полученные результаты подтверждают актуальность и перспективность использования быстродействующих компараторов в современных высокопроизводительных электронных системах.

Список источников

[1] Абрамов И.И., Дворников О.В. Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов. *Нано и микросистемная техника*, 2005, № 10, с. 23–35.

[2] Stefanovic D., Kayal M. *Structured Analog CMOS Design.* Springer, 2008, 290 p.

[3] Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. *Теория передачи сигналов.* Москва, Радио и связь, 2011, 368 с.

[4] Андреев Д.В., Курносенко А.Е., Макарчук В.В., Соловьев В.А. *Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 467 с.

[5] Андреев В.В., Жалнин В.П., Столяров А.А. *Физические основы микро- и наноэлектроники.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 292 с.

High-Speed Voltage Comparator Integrated Circuit

Lykov Andrey Dmitrievich lyykovad@student.bmstu.ru
Andreev Vladimir Viktorovich vladimir_andreev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The structure and operating principles of a high-speed voltage comparator integrated circuit are examined. A block diagram is presented, including an input differential amplification stage, an amplification stage, a differential stage, strobing circuits, and output stages providing TTL level compatibility. It is shown that the use of Schottky diode technology allows achieving short delay times — on the order of 26 ns — with a given high gain. It is concluded that the integrated circuit can be used in analog-to-digital conversion systems, high-speed comparison circuits, and memory read devices.

Keywords: *integrated circuit, comparator, block diagram*

Секция 4. Тепловые двигатели и гидромашины

УДК 621.22

Особенности выбора схемы включения питательных насосов в тепловую схему паротурбинной установки

Иванов Марк Александрович m19m075@yandex.ru
Савин Владимир Юрьевич savinvu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены особенности выбора схемы включения питательных насосов в тепловую схему паротурбинной установки. Проанализированы классификация и особенности каждого способа подключения насосного оборудования. Приведена выбранная схема включения, сделаны необходимые расчеты в подтверждение ее экономической и конструктивной целесообразности использования в работе. Сделаны выводы о том, какая схема наиболее подходит в работе паротурбинной установки малой мощности и почему такие схемы наиболее целесообразны.

Ключевые слова: *питательные насосы, схема подключения питательных насосов, тепловая схема паротурбинной установки, привод насоса, регулирование питательных насосов*

Питательные насосы (ПН) играют ключевую роль в паротурбинных установках (ПТУ), обеспечивая подачу воды в котел для генерации пара. Схема их включения определяется типом привода, интеграцией с другими компонентами, а также требованиями к эффективности, надежности и стоимости. В конденсационных паротурбинных установках (КПТУ) сравнительно небольшой мощности (до нескольких десятков мегаватт) правильный выбор и компоновка особенно важны: от этого зависят надежность питания котла (или парогенератора), экономичность работы и эксплуатационная гибкость [1]. В работе рассмотрены возможные схемы включения ПН, их преимущества и недостатки, а также даны рекомендации по выбору.

Обоснования выбора включают повышение надежности и кавитационной устойчивости, улучшение энергоэффективности, а также обеспечение благоприятных пусковых режимов. Такая конфигурация обеспечивает устойчивое и экономичное питание котла при минимизации капитальных и эксплуатационных затрат для данного класса мощностей.

Питательный насос обеспечивает: подачу конденсата после конденсатора через систему подогревателей низкого давления (ПНД) и деаэратор к котлу; преодоление гидравлического сопротивления системы; создание давления, превышающего давление насыщенного пара в котле, чтобы предотвратить закипание в тракте.

Для установки мощностью 12 МВт давление пара котла, как правило, невысокое (от 3,5 до 9 МПа), поэтому вопросы оптимальности схемы включения насосов напрямую связаны с обеспечением энергопотребления и надежности.

Приведем краткую классификацию возможных схем подключения питательных насосов в тепловую схему установки. Классификация имеет вид:

по типу привода; по количеству подъемов; по расположению относительно деаэратора; по способу регулирования подачи; по наличию резервирования; последовательное/параллельное подключение насосных агрегатов.

В качестве привода питательных насосов используют: электродвигатели, турбины, механический или гидравлический привод, комбинированные или гибридные системы [2].

При использовании электрического привода питательные насосы приводятся в действие электродвигателями, которые питаются от внешней электросети или генераторов станции. Это один из самых распространенных вариантов в современных паротурбинных установках, особенно в малых и средних системах. В паровом приводе насосы интегрируются с небольшой паровой турбиной (турбонасос), которая использует часть отработанного пара из основной турбины или котла. Это позволяет напрямую преобразовывать тепловую энергию пара в механическую работу насоса. Также насосы могут быть механически связаны с главной турбиной через шестерни, ремни или другие передачи, или использовать гидравлические системы для привода. Еще существуют комбинированные системы, которые сочетают несколько типов привода, например основной электрический с резервным паровым или механическим. Это позволяет повысить надежность и адаптивность системы.

По количеству подъемов система может быть одного подъема, одного подъема с предвключенным (бустерным) насосом, двухподъемной. В системе одного подъема установка питательного насоса производится до подогревателей высокого давления [3]. В схеме с бустерным насосом система та же, но перед питательным ставится предвключенный насос для создания дополнительного подпора. В двухподъемной системе помимо насоса первого подъема, устанавливается питательный насос между подогревателями высокого давления и парообразующим агрегатом.

Относительно расположения деаэратора: деаэратор относительно питательного насоса возможно установить на высоте 12–15 м, без предвключенного насоса, или на отметке 0, но с использованием предвключенного насоса.

По регулирующей арматуре и регулирования подачи различают способы: дросселирование на напорной линии (регулирование сопротивлением); регулирование частотой вращения двигателя (с помощью преобразователя частоты — ПЧ); регулирование перепуском части потока (байпасом); установка гидромуфты на линии ЭД–ПН.

В паротурбинных установках применяется система резервирования. Рационально использовать схему N+1: два электроприводных ПН по 100 % каждый (один в работе, один в резерве). Допускается установка малого пуско-аварийного ПН 20–30 % на отдельном вводе.

Возможно применение последовательных/параллельных систем или одного насоса. Насос одного агрегата подает воду через всю систему. Схема проста, оборудование — минимально. Используется на малых установках (до ~5 МВт), но при мощности 12 МВт она недостаточно надежна из-за отсутствия резервирования [4]. В случае двух параллельно работающих одина-

ковых насоса каждый насос подает половину расхода. Этот вариант снижает нагрузку на каждую машину, облегчает плавность регулирования. Однако при отказе одного насоса второй может оказаться недостаточным для полного обеспечения котла, что критично. Последовательная установка нескольких питательных насосов применяется в установках крупного масштаба. Такая схема необходима, когда напора, развиваемого одним насосом недостаточно, а увеличение ступеней невозможно, то устанавливают последовательно второй насос, обеспечивая требуемое давление.

Проанализировав типы приводов для питательных насосов, можно сделать вывод, что электродвигатель является наиболее благоприятным вариантом.

Обоснуем свой выбор небольшими расчетами, проведем оценку расхода, напора и мощности ПН:

Для 12 МВт КПТУ расход питательной воды m≈72 т/ч (20 кг/с).

Разность давлений:

$$\Delta p = p_{\text{после ПН}} - p_{\text{ДА}} = 4{,}2 - 0{,}6 = 3{,}6 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $p_{\text{после ПН}}$ = 4,2 МПа — давление в напорной линии питательного насоса; $p_{\text{ДА}}$ = 0,6 МПа — давление в деаэраторе.

Объемный расход через питательный насос:

$$Q = \frac{m}{\rho} = 0{,}02 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

Оценка потребной мощности:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_{\text{ПН}}} = \frac{0{,}02 \cdot 3{,}6 \cdot 10^6}{0{,}75} = 100 \text{ кВт}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{ПН}}$ = 75 % — КПД питательного насоса.

Вывод. Доля на собственные нужды мала (<1,5 % от 12 МВт), электропривод экономичен и прост. Электроприводной ПН мощностью 0,1 МВт электроэнергии против 12 МВт генерации — потери ничтожны в отличие от паротурбинного привода. Паротурбинный привод на малой мощности: заметные потери электрической выработки из-за отбора/подачи свежего пара на привод; усложнение схемы (конденсатор привода, маслосистема, регулирование), рост стоимости. На блоках <50 МВт обычно экономически нецелесообразен.

Для КПТУ мощностью 12 МВт рациональной является схема включения питательных насосов с резервированием (рис. 1): один рабочий и один резервный питательный насос, расположенные после деаэратора с подпорными насосами, либо без них, но в этом случае придется располагать деаэратор на высоте 12–15 м. У каждого ПН — индивидуальный АРВ минимального расхода с возвратом в деаэратор; регулирование — трехэлементное по уровню в барабане, расходу пара и расходу питательной воды; предусмотрен пусковой байпас ПВД. Таким образом, предложенная схема включения питательных насосов наилучшим образом соответствует требованиям, предъявляемым к рассматриваемой установке.

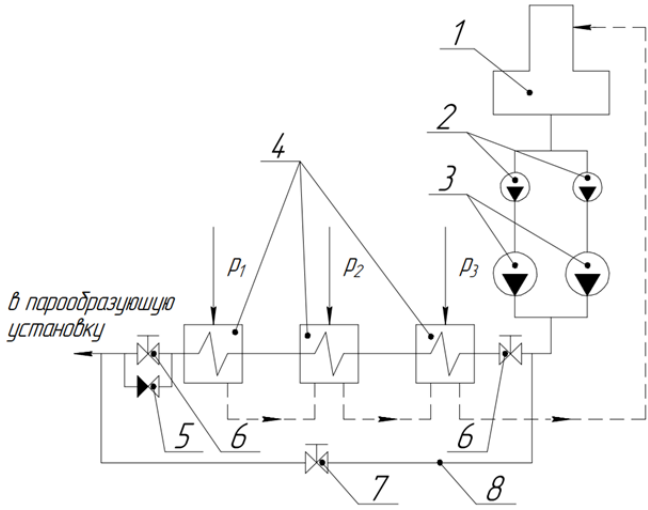


Рис. 1. Схема включения питательных насосов с резервированием:
1 — деаэратор; *2* — бустерные (предвключенные насосы); *3* — питательные насосы; *4* — ПВД; *5* — обратный клапан; *6* — запорный клапан; *7* — байпасный клапан; *8* — байпасная линия

Список источников

[1] *Паротурбинные установки. Программа, методические указания по изучению дисциплины*. Казань, Казан. гос. энерг. ун-т, 2014, 66 с.

[2] Замалеев М.М., Маликов М.А., Шарапов В.И. *Технология централизованного производства тепловой и электрической энергии*. Ульяновск, УлГТУ, 2009, 223 с.

[3] Лебедев В.А., Пискунов В.М. *Основы энергетики*. Санкт-Петербург, Лань, 2019, 140 с.

[4] Медников А.Ф., Лебедева А.И. *Насосы АЭС: практикум*. Москва, Изд-во МЭИ, 2022, 88 с.

Features of choosing a scheme for including feed pumps in the thermal scheme of a steam turbine installation

Ivanov Mark Alexandrovich m19m075@yandex.ru
Savin Vladimir Yurievich savinvu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The features of choosing a scheme for including feed pumps in the thermal scheme of a steam turbine installation are considered. The classification and features of each method of connecting pumping equipment are analyzed. The selected switching scheme is presented, the necessary calculations are made to confirm its economic and constructive feasibility of use in the work. Conclusions are drawn about which scheme is most suitable for the operation of a low-power steam turbine installation and why such schemes are most appropriate.

Keywords: *feed pumps, feed pump connection scheme, thermal scheme of a steam turbine unit, pump drive, regulation of feed pumps*

УДК 536.24

Исследование эффективности теплообмена с применением различных структурированных поверхностей

Жидкова Анастасия Дмитриевна zhidkovaad@student.bmstu.ru
Юрик Елена Алексеевна eayurik@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Методом вычислительной гидродинамики (CFD) в программном комплексе Ansys Fluent проведено исследование эффективности применения структурированных поверхностей для интенсификации теплопередачи в теплообменном аппарате. Смоделированы три типа поверхностей: сферические и полусферические выступы, а также сферические выемки. Установлено, что все рассмотренные интенсификаторы повышают теплообмен, при этом для условий работы с морской водой наиболее рациональным вариантом признаны полусферические выступы.

Ключевые слова: *теплообмен, интенсификация, теплообменный аппарат, эффективность, поверхность теплообмена, CFD-моделирование*

Теплообмен в каналах со структурированными поверхностями характеризуется сложной гидродинамикой, включающей зоны отрыва потока, вторичные течения и рост гидравлического сопротивления, что комплексно влияет на коэффициенты теплоотдачи (α) и сопротивления (ξ) [1]. Интенсификация теплообмена в таких условиях является ключевой задачей для повышения энергоэффективности теплообменного оборудования в энергетике, химической технологии и судостроении.

Для анализа этих процессов применяют несколько методик. Наиболее распространенный подход основан на эмпирических корреляциях, связывающих критерии подобия Нуссельта (Nu), Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr) с геометрическими параметрами поверхности. Несмотря на простоту, этот метод требует значительных экспериментальных затрат и не позволяет учесть локальные гидродинамические и тепловые эффекты [2]. Кроме того, область применения таких корреляций часто ограничена диапазоном чисел Рейнольдса и конкретной геометрией, для которых они были получены.

Более точные результаты позволяют получить методы вычислительной гидродинамики (CFD). В отличие от эмпирических моделей, CFD-моделирование учитывает локальную структуру потока, включая зоны отрыва, вихреобразование и неравномерность температурных полей [3]. Это делает CFD-подход мощным инструментом для оптимизации теплообменных аппаратов.

В данной работе методами вычислительной гидродинамики в программном комплексе Ansys Fluent [4] исследована эффективность применения структурированных поверхностей для интенсификации теплопередачи. Учитывая, что рабочим телом является морская вода, склонная к образованию

отложений, в качестве интенсификаторов были выбраны неглубокие полусферические и сферические выступы, а также полусферические выемки. Данная геометрия минимизирует риск засорения и упрощает очистку. Схемы расположения исследуемых интенсификаторов представлена на рис. 1.

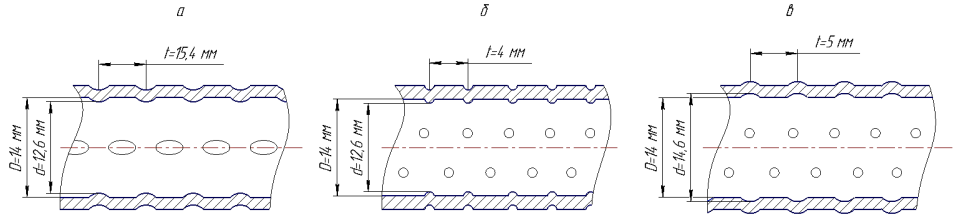


Рис. 1. Схемы расположения исследуемых интенсификаторов:
а — канал с полусферическими выступами; *б* — канал со сферическими выступами; *в* — канал с полусферическими выемками

Эффективность труб с модифицированной поверхностью сравнивалась с гладкой трубой. Моделировался участок трубы длиной 210 мм и межтрубное пространство. В трубе течет охлаждающая морская вода, а в межтрубном пространстве — поперечный поток конденсата, омывающий трубки снаружи. Внутренний диаметр трубы 14 мм, толщина стенки 1 мм. Моделирование проводилось с использованием модели турбулентности SST k–ω и алгоритма SIMPLEC [5].

Задавались начальные параметры морской воды: скорость 1,2 м/с (что соответствует турбулентному режиму течения) и температура 20 °C. Начальные параметры конденсата: скорость 0,13 м/с и температура 28,8 °C. На выходе задавалось атмосферное давление. Физические свойства морской воды и конденсата взяты по средней температуре. Для морской воды дополнительно учитывался процент солености.

Результаты моделирования представлены в таблице. Эффективность интенсификаторов оценивалась по критерию, основанному на формуле прироста прироста коэффициента теплоотдачи относительно прироста гидравлического сопротивления:

$$\mathrm{E} = \frac{\alpha/\alpha_0}{\Delta P_{\text{тр}}/\Delta P_{\text{тр0}}}, \qquad (*)$$

где $\alpha_0, \Delta P_{\text{тр0}}$ — коэффициент теплоотдачи и гидравлическое сопротивления для гладкой трубы.

Данный критерий (*), известный как коэффициент эффективности, широко используется для сравнительного анализа: значение больше 1 указывает на целесообразность применения интенсификатора.

Наибольший прирост коэффициента теплоотдачи, достигающий 40 %, демонстрируют каналы со сферическими выступами, однако этот вариант сопровождается чрезмерным увеличением гидравлического сопротивления —

на 129 %. Такой значительный рост потерь давления делает данную конструкцию нерациональной для практического применения, несмотря на впечатляющие показатели теплопередачи. Коэффициент эффективности для данной конфигурации составил 0,9, что ниже единицы.

Сравнительная таблица характеристик

Параметр/интенсификатор	Гладкая труба	Полусфер. выступы	Сфер. выступы	Полусфер. выемки
Перепад давления ΔP, Па	210	280	480	305
Скорость потока в трубе c, м/с	1,270	1,302	1,630	1,315
Коэффициент теплоотдачи α, Вт/(м^2 · K)	6168	12636	13210	8652
Коэффициент прироста E	–	1,53	0,9	1,01

Оптимальным решением с точки зрения баланса теплогидравлических характеристик являются полусферические выступы. Они обеспечивают существенное увеличение теплоотдачи на 25 % при умеренном росте гидравлического сопротивления на треть. Такой вариант особенно предпочтителен для работы с морской водой, среди всех исследованных конфигураций и менее склонен к засорению по сравнению с другими типами интенсификаторов. Коэффициент эффективности для полусферических выступов составил 1,53, что подтверждает их преимущество.

Полусферические выемки занимают промежуточное положение, показывая умеренное улучшение теплообмена на 23 % при сравнительно небольшом, но все же заметном увеличении потерь давления на 45 %. Коэффициент эффективности для выемок составил 1,01, что также указывает на нецелесообразность их применения.

Таким образом, комплексный CFD-анализ подтвердил, что для интенсификации теплообмена при течении морской воды оптимальным выбором являются полусферические выступы. Они обеспечивают наилучший компромисс между приростом теплопередачи и увеличением гидравлических потерь, а также обладают наименьшей склонностью к зарастанию. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании высокоэффективных и надежных теплообменных аппаратов для работы в агрессивных и склонных к солеотложениям средах.

Список источников

[1] Леонтьев А.И., Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М. *Научные основы технологий XXI века.* Москва, Энергомаш, 2000, 136 с.

[2] Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. *Теплообменные аппараты ТЭС.* Москва, Изд-во МЭИ, 2022, 245 с.

[3] Олимпиев В.В., Абдрахманов А.Р., Алексеева О.В. *Модель течения и расчет теплообмена и трения в канавках, обтекаемых турбулентным потоком. Интенсификация теплообмена.* Москва, Изд-во МЭИ, 1998, с. 175–177.

[4] Горбачев М.В., Наумкин В.С., Спарин В.А. *Моделирование задач теплообмена в среде ANSYS FLUENT.* Новосибирск, НГТУ, 2023, 118 с.

[5] Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. *Основы работы в ANSYS 17.* Москва, ДМК Пресс, 2017, 210 с.

Study of heat transfer efficiency using various structured surfaces

Zhidkova Anastasia Dmitrievna zhidkovaad@student.bmstu.ru
Yurik Elena Alekseevna eayurik@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article investigates the efficiency of structured surfaces for heat transfer enhancement in a heat exchanger using computational fluid dynamics (CFD) in the ANSYS Fluent software. Three types of surfaces were modeled: spherical protrusions, hemispherical protrusions, and spherical dimples. It was found that all considered enhancers improve heat transfer; however, for operation with seawater, hemispherical protrusions were identified as the most rational option.

Keywords: *heat transfer, enhancement, heat exchanger, efficiency, heat transfer surface, CFD modeling*

УДК 621.58

Исследование работы сухой вентиляторной градирни при изменении параметров охлаждающего воздуха

Кашанов Никита Андреевич nkashanov@gmail.com
Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведено сопоставление расчетных и эксплуатационных характеристик работы сухой вентиляторной градирни парогазового энергоблока мощностью 220 МВт при изменении расхода и температуры охлаждающего воздуха. Для эксплуатационных данных учтен 15-минутный лаг и применено сглаживание. Показано совпадение трендов и сопоставимость уровней температур охлаждаемой воды, что позволяет использовать расчетные кривые для дополнения и «очистки» эксплуатационных данных при обучении моделей прогнозирования и управления вентиляторами градирни.

Ключевые слова: *сухая вентиляторная градирня, тепловая нагрузка, изотермы, массовый расход воздуха, переменные режимы работы*

Эффективность работы сухой вентиляторной градирни водоохлаждаемого конденсатора парогазового блока ПГУ-220Т определяется температурой охлаждаемой воды, а также температурой, влажностью и расходом охлаждающего воздуха (режимом работы вентиляторов градирни), силой и направлением ветра [1, 2].

Цель данного исследования — сопоставить расчетные характеристики переменных режимов работы градирни и полученные на реальном объекте показатели ее работы при изменении параметров охлаждающего воздуха, а также оценить возможность применения расчетных зависимостей для дополнения эксплуатационных данных при обучении нейросетевых моделей управления вентиляторами градирни.

Методика расчета характеристик градирни опирается на параметры ее номинального режима (базовой точки), включающие паспортные температуры, расходы и коэффициент теплопередачи K. В рамках подхода малых приращений формировалась окрестности ±20 % от номинальных величин; строились срезы при фиксированной тепловой нагрузке Q [1]. Расход воды и ее температура на входе в градирню принимались постоянными для каждого среза, а температура воздуха на входе изменялась в диапазоне 8–25 °С. Для каждой изотермы по воздуху задавался свой диапазон массового расхода воздуха ($G_{возд}$), согласованный с реально достижимыми режимами вентиляторов; температура воздуха ($T_{вз}$) на выходе определялась из теплового баланса градирни. Таким образом было получено семейство кривых для температуры воды на выходе из градирни $T_{вых} = f(G_{возд})$ при различных $T_{вз}$, характеризующее чувствительность эффективности теплоотдачи к расходу воздуха в зависимости от погодных условий [3]. Наличие ветра не учитывалось.

Эксплуатационные измерения включали температуры воды на входе и выходе, температуру наружного воздуха, расход воды через градирню и частоты вращения трех вентиляторов (определяющие их расходную характеристику), два из которых имеют ступенчатое регулирование, а один — частотно-регулируемый привод. С целью учета гидравлической и тепловой инерции введен 15-минутный лаг по температурам воды, определенный по корреляционному анализу изменения температур, а также мягкое усреднение для подавления одиночных выбросов, связанных с переходными режимами и ветровым воздействием на воздухозабор [4].

Для сопоставимости представления данных были построены зависимости при фиксированной тепловой нагрузке Q в диапазоне 5–11 МВт, где по оси X отложен массовый расход воздуха $G_{возд}$, а по оси Y — температура охлаждающей воды на выходе $T_{вых}$; линии соответствуют изотермам температуры воздуха на входе $T_{вз}$. На рис. 1 приведены расчетные зависимости для Q = 11 036 кВт, а на рис. 2 — эксплуатационные данные при сопоставимой тепловой нагрузке $Q \approx 11\,000$ кВт с учетом лага и усреднения [5].

Качественный анализ показывает единство основного тренда: рост $G_{возд}$ ведет к монотонному снижению $T_{вых}$, а повышение $T_{вз}$ сдвигает изотермы вверх, уменьшая «охлаждающий выигрыш» от дополнительных оборотов. В расчетном семействе кривых наклон заметно больше для низких $T_{вз}$ (8–12 °C), когда температура поступающего воздуха далека от температуры охлаждаемой воды, и, напротив, выравнивается при более теплом воздухе; такая же закономерность прослеживается и при эксплуатации градирни, хотя локально кривые имеют изломы из-за дискретного переключения вентиляторов и ограничений по частотам их вращения.

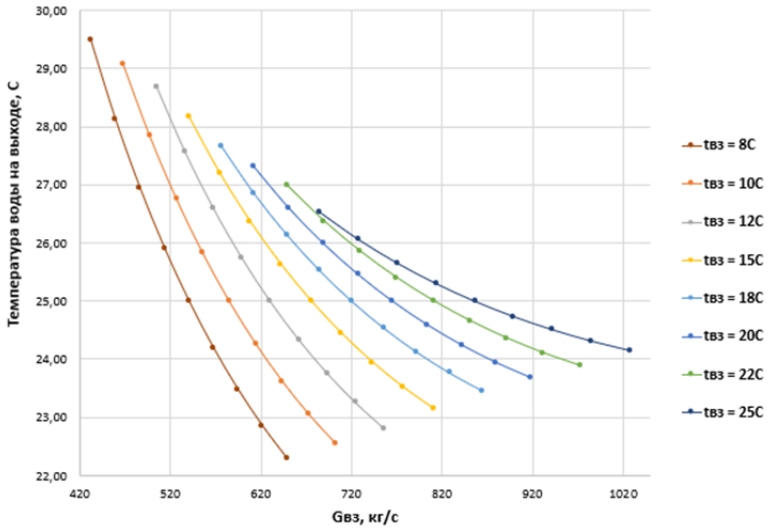


Рис. 1. Расчетные зависимости при Q = 11 036 кВт

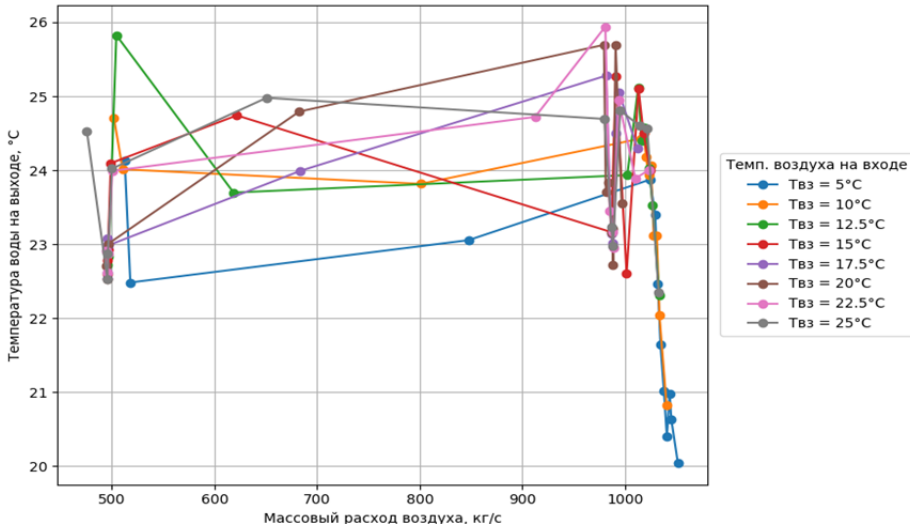


Рис. 2. Эксплуатационные данные при $Q \approx 11\,000$ кВт

Уровни температур для номинальной нагрузки хорошо совпадают: в обоих наборах данных $T_{вых}$ находится в интервале 22–26 °C; среднее расхождение по уровню не превышает 1 °C, что подтверждает применимость метода малых приращений для воспроизведения рабочих зависимостей.

Различия между графиками хорошо интерпретируются физически: в эксплуатации на изменение $T_{вых}$ влияют мгновенные порывы ветра, вариации влажности и неоднородность распределения потоков через пучки труб, тогда как расчетные кривые описывают идеализированный установившийся режим и потому гладкие и монотонные. Влияние лага по воде и усреднения вносит сглаживание кластеров точек на рис. 2, но не устраняет полностью изломы,

Построенная по совокупности кривых поверхность $T_{вых} = f(Q, T_{вз}, G_{возд})$ позволяет синтезировать дополнительные точки в пространствах редких режимов, проводить регуляризацию при обучении нейросетей и восстанавливать корректные значения температур при кратковременных сбоях датчиков. В практическом управлении это дает возможность формировать расписания оборотов с учетом ожидаемого погодного профиля, а также оценивать энергетическую целесообразность включения дополнительных вентиляторов еще до наступления температуры замерзания воды.

Исследование показало, что проведенный расчет и эксплуатационные данные демонстрируют совпадающее тренды и близкие уровни температур. Имеющиеся различия объясняются дискретностью фактического регулирования и нестационарностью натурных условий, а расхождение по среднему уровню не превышает 1 °C. Это подтверждает корректность методики расчета и возможность использования полученных зависимостей как эталонных при верификации и калибровке эксплуатационных данных, а также как источника синтетических данных для повышения устойчивости и обобщающей

способности моделей прогнозирования и управления вентиляторными градирнями.

Список источников

[1] Мильман О.О., Федоров В.А. *Воздушно-конденсационные установки и сухие градирни*. Калуга, Манускрипт, 2019, 388 с.

[2] Жинов А.А., Шевелев Д.В. Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2015, № 1(100), с. 108–118.

[3] Lefebvre X., Ashok V., Claveau-Mallet D., Robert É., Bédard É. Data-Driven Cooling Tower Optimization: A Comprehensive Analysis of Energy Savings using Microsand Filtration. *Advanced Sustainable Systems*, 2023, vol. 7, art. no. 2300089. https://doi.org/10.1002/adsu.202300089

[4] Wenzel P.M., Fensterle E., Radgen P. Catalyzing Cooling Tower Efficiency: A Novel Energy Performance Indicator and Functional Unit including Climate and Cooling Demand Normalization. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 21, art. no. 15454. https://doi.org/10.3390/su152115454

[5] Cheng H., Xu X., Sun Y. et al. A statistical training data cleaning strategy for the PCA-based chiller performance model. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 112, pp. 112–120. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.060

Investigation of the operation of a dry fan cooling tower when changing the parameters of the cooling air

Kashanov Nikita Andreevich nkashanov@gmail.com
Zhinov Andrey Aleksandrovich azhinov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A comparison of the design and operational dependencies of the operation of a dry fan cooling tower of a 220 MW combined-cycle gas unit with a change in the parameters of the cooling air is considered. The mass air flow is plotted on the X-axis, and the temperature of the cooling water at the outlet is plotted on the Y-axis; the lines correspond to the isotherms of the inlet air temperature. The 15-minute water lag and data smoothing are taken into account. The coincidence of trend directions and comparability of temperature levels is shown, which makes it possible to use calculated curves to supplement and purify operational data when training forecasting and fan control models.

Keywords: *dry fan cooling tower, thermal load, isotherms, mass air flow, variable operating modes*

УДК 621.313.1

Совершенствование системы воздушного охлаждения электродвигателя

Шевелев Денис Владимирович denis.v.shevelev@bmstu.ru
Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предложено три варианта конструкции системы принудительного воздушного охлаждения электродвигателя отличающихся типами рабочих колес вентилятора. Проведено моделирование течения в тракте системы охлаждения с сопряженным теплообменом. Получены данные по температурному состоянию корпуса электродвигателя, аэродинамические характеристики предложенных конструкций рабочих колес вентиляторов. Проведен анализ результатов и сформулированы рекомендации по применению конкретной конструкции рабочего колеса вентилятора и дополнительных мероприятий по улучшению теплообмена.

Ключевые слова: *охлаждение электродвигателя, вентилятор, сопряженный теплообмен, воздушное охлаждение*

В настоящее время в качестве силового привода все большее распространение получают электродвигатели на постоянных магнитах. К числу их преимуществ относится их компактность, малый вес, высокая плотность магнитного поля и высокий КПД в широком диапазоне нагрузок [1]. Электродвигатель на постоянных магнитах, как и любой другой двигатель обладает КПД меньшим 100 % и часть электрической энергии он преобразует не в механическую, а тепловую. Основными причинами этого являются Джоулевы потери в обмотках статора, магнитные потери, механические потери на трение в подшипниках.

Компактность электродвигателей на постоянных магнитах, как преимущество, является и относительным недостатком — она приводит к высокой объемной плотности тепловыделения и, как следствие, сильному нагреву, как элементов статора, так и ротора. Превышение температуры точки Кюри для постоянных магнитов недопустимо [2, 3], что требует создания тех или иных систем охлаждения.

В большинстве случаев, обеспечить удовлетворительное температурное состояние двигателя возможно применяя систему самовентиляции от укрепленного на валу двигателя радиального вентилятора, обдувающего внешнюю поверхность двигателя [4].

При разработке конструкции такой системы охлаждения и конструкции вентилятора выдвигается ряд требований, а именно:

– эффективный отвод тепла на всех режимах работы электродвигателя и разных атмосферных условиях;

– ограничения на осевой и радиальный размер системы охлаждения;

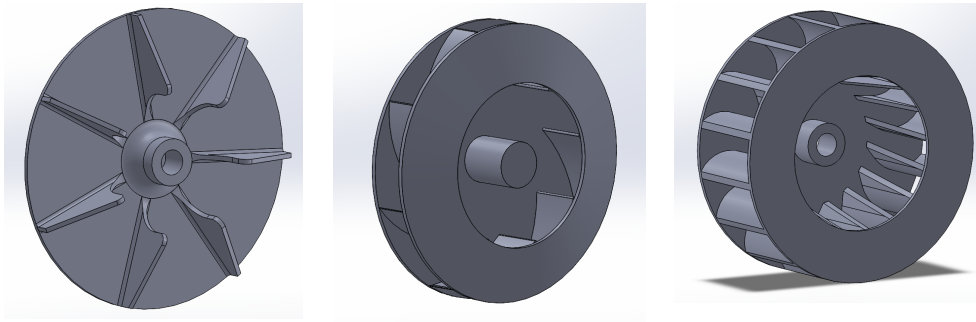
– возможность работы в реверсивном режиме;

– обеспечение прочностных характеристик рабочего колеса вентилятора на всех режимах работы электродвигателя;

– высокий КПД системы охлаждения;

– низкая шумность системы охлаждения.

При реализации этих требований для высокоэффективного реверсивного электродвигателя было предложено использовать развитое оребрение наружного корпуса с покрывным кожухом, внутрь которого центробежным вентилятором подводится атмосферный воздух и после нагрева выбрасывается в атмосферу. Было предложено три варианта конструкции рабочего колеса (РК) вентилятора с одинаковым втулочным отношением и наружным диаметром, представленные на рис. 1.



а *б* *в*

Рис. 1. Рабочие колеса вентилятора:
а — тип 1 (реверсивное с прямыми лопатками); *б* — тип 2 (реактивное, лопатки загнуты против вращения); *в* — тип 3 (активное, лопатки загнуты по вращению)

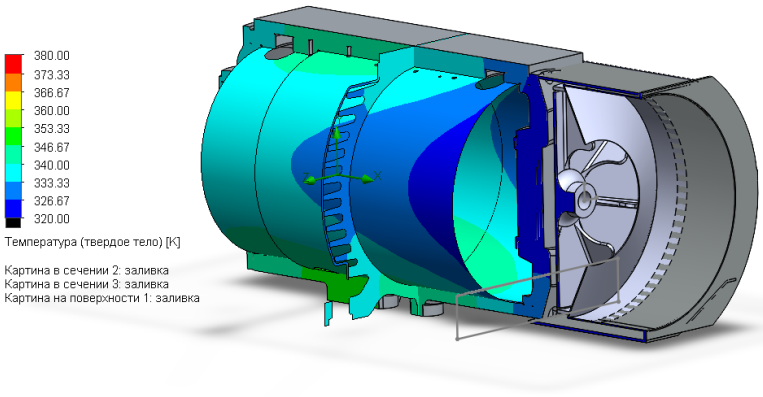
В результате моделирования сопряженного теплообмена при работе системы охлаждения электродвигателя были получены аэродинамические характеристики РК вентилятора и распределение температуры на внутренней поверхности корпуса при фиксированной величине теплового потока к внутренней поверхности корпуса 2,3 кВт. Результаты моделирования сопряженного теплообмена представлены на рис. 2.

В таблице представлены: расход воздуха Q, м^3/с; полное давление РК вентилятора p_v, Па; скорость воздуха на выходе из вентилятора c_2, м/с; максимальная и средняя температура внутренней стенки корпуса; крутящий момент M, Н·м, и мощность N, Вт, для трех спроектированных вентиляторов при рабочей (фиксированной) частоте их вращения 7000 об/мин.

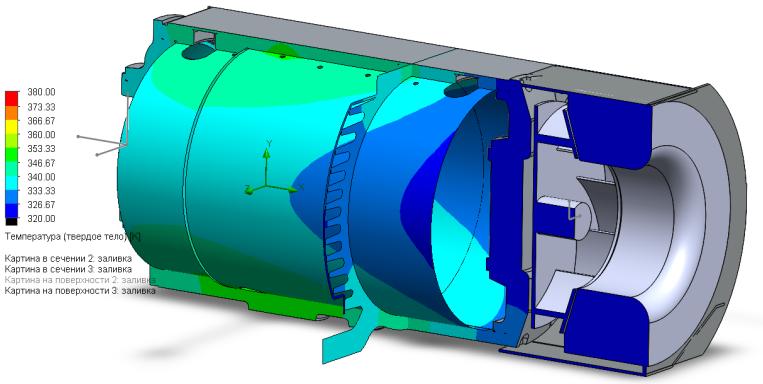
Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. На рабочей частоте вращения ротора все три типа РК при тепловой нагрузке 2,3 кВт обеспечивают приемлемое температурное состояние внутренней стенки корпуса — средняя температура стенки менее 65 °С.

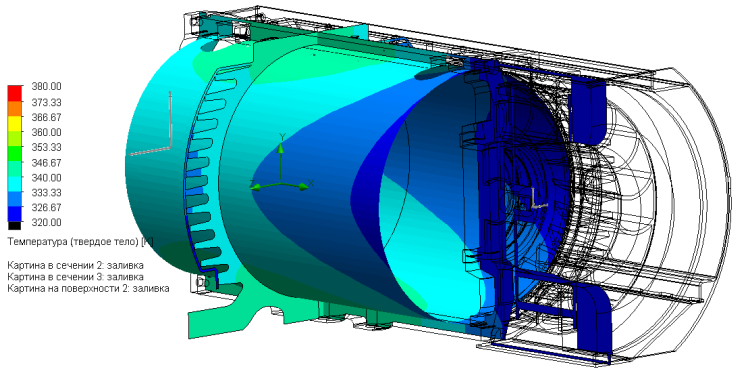
2. Наибольшие затраты мощности у колеса тип 3, наименьшие у колеса тип 2.



а



б



в

Рис. 2. Результаты моделирования сопряженного теплообмена:
а — тип 1; *б* — тип 2; *в* — тип 3

Характеристики системы воздушного охлаждения

РК	Q, м^3/с	p_v, Па	c_2, м/с	$t_{вн.\,ст.\,ср}$, °C	$t_{вн.\,ст.\,max}$, °C	M, Н·м	N, Вт
Тип 1	0,1481	3290	60	63	75	0,951	697
Тип 2	0,137	1086	32	64	76	0,572	419
Тип 3	0,274	3840	73	62	73	1,881	1379

3. Рабочее колесо вентилятора тип 1 представляется более целесообразным к реализации, ввиду большей прочности и технологичности, а также из-за возможности реверсивного использования.

Рекомендуется при неизменных габаритах двигателя увеличить плавность внутренних обводов канала от выхода из вентилятора до входа в каналы ребер охлаждения корпуса для уменьшения потерь давления на этом участке.

Полученные результаты относятся к температурному состоянию корпуса электродвигателя. Тепловое состояние обмоток статора и ротора, условия теплового контакта обмоток статора с корпусом электродвигателя требуют отдельного исследования.

Список источников

[1] Кенио Т., Нагамори С. *Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами.* Москва, Энергомашиздат, 1989, 184 с.

[2] Нагайцев В.И., Сергеев С.В., Сизякин А.В. Эволюция требований к свойствам материалов постоянных магнитов для электрических машин. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*, 2021, № 1, с. 99–107.

[3] Кунцевич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. *Ферриты: энциклопедический справочник. Т. 1. Магниты и магнитные системы.* Санкт-Петербург, Лик, 2004, 358 с.

[4] ГОСТ 20459–87. *Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения. Обозначения.* Москва, Государственный комитет СССР по стандартам, 1989, 16 с.

Improving the electric motor air cooling system

Shevelev Denis Vladimirovich denis.v.shevelev@bmstu.ru

Zhinov Andrey Alexandrovich azhinov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Three design options for the forced air cooling system of an electric motor with different types of fan impellers are proposed. A simulation of the flow in the cooling system path with coupled heat exchange is carried out. Data on the temperature state of the electric motor housing and the aerodynamic characteristics of the proposed fan impeller designs were obtained. The results were analyzed and recommendations were formulated for the application of a specific design of the fan impeller and additional measures to improve heat transfer.

Keywords: *electric motor cooling, fan, conjugate heat transfer, air cooling*

УДК 621.165

Использование CAE-пакета FlowVision для определения потерь в лопаточных решетках паровых турбин

Жариков Артем Андреевич artemzhrk@gmail.com
Шевелев Денис Владимирович denis.v.shevelev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Целью данной работы являлась верификация расчета профильных потерь в лопаточной решетке на основе профиля С-9015А с использованием CAE-пакета FlowVision. Верификация проводилась путем сравнения результатов численного моделирования с данными натурного эксперимента и результатами, полученными в пакете STAR CCM+. В каждом пакете использовались различные модели турбулентности и подходы к моделированию пограничного слоя. Полученные зависимости коэффициента потерь от числа Маха, рассчитанные в FlowVision и STAR CCM+, сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *турбина, проточная часть, термогазодинамический расчет ступени, потери кинетической энергии, профильные потери, численное моделирование*

Достоверность аналитического расчета проточной части турбины по средней линии тока в значительной степени зависит от методики определения потерь в ее лопаточных решетках. В их формировании ключевую роль играет механизм профильных потерь, связанный с особенностями развития пограничного слоя на поверхности лопаток.

Давно известны и используются при определении коэффициентов профильных потерь зависимости, обобщающие результаты экспериментальных данных продувок плоских решеток [1–3]. Использование характеристик, полученных при натурных исследованиях, является наиболее достоверным методом определения потерь, однако количество исследованных вариантов ограничено и не позволяет покрыть все возникающие в ходе расчетов комбинации геометрических характеристик лопаточных решеток.

Существуют полуэмпирические методики расчета профильных потерь по ключевым геометрическим характеристикам решеток: углов входа и выхода потока, степени конфузорности решеток, толщин выходных кромок, шага решетки и пр. [4–7]. Однако границы применимости этих методик узки и, зачастую, неизвестны. Результаты, полученные по методикам различных авторов, не всегда хорошо согласуются друг с другом.

Исследование аэродинамических характеристик решеток профилей при помощи методов численного эксперимента — один из возможных способов верификации и уточнения таких методик. В настоящее время существует большое количество пакетов программ, позволяющих проводить численное моделирование газодинамических процессов — так называемых CFD-пакетов. Наибольшее распространение получили такие CFD-пакеты как An-

sys, STAR CCM+, FloEFD, их альтернативой является, продукт российского разработчика инженерного ПО — фирмы ТеСИС, CFD пакет FlowVision [8]. В основе работы всех CFD-пакетов лежит численное решение уравнений движения вязкой жидкости (уравнений Навье — Стокса), дополненных вспомогательными уравнениями сохранения энергии и массы, а также граничными условиями.

Целью данной работы являлась верификация расчета профильных потерь лопаточной решетки на основе профиля С-9015А (рис. 1) при помощи CFD-пакета FlowVision, сравнение полученных результатов с данными натурного эксперимента и расчета с помощью CFD-пакета STAR CCM+.

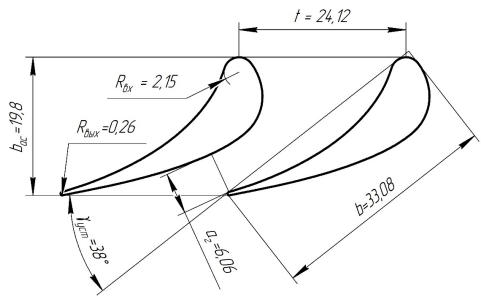


Рис. 1. Геометрические характеристики лопаточной решетки на базе профиля С-9015А

В ходе моделирования исследовалась двумерная модель расчетной области, задавались полные параметры потока на входе в решетку — полное давление рабочего тела (водяного пара) p_0^*=1 МПа, t_0^*=320 °С. Для граничного условия выхода из лопаточной решетки задавался ряд статических давлений, определяющий располагаемый теплоперепад на решетку для получения необходимого диапазона чисел M_{1t}. На поверхности лопатки задавалась шероховатость, соответствующая 9 классу чистоты поверхности — $Ra = 3{,}2 \cdot 10^{-7}$м .

В программном пакете STAR CCM+ использовалась модель турбулентности $k-\omega\ SST$ (Shear Stress Transport) с дополнительной моделью ламинарно-турбулентного перехода $\gamma - Re_\theta$.

Для исследования в пакете Flowvision была выбрана модель турбулентности $k-\varepsilon$ Flowvision (KEFV), доработанная компанией ТеСИС. Для разрешения пограничного слоя использовались неравновесные пристеночные функции (собственная разработка компании).

Целью моделирования ставилось нахождение параметров потока на выходе из лопаточной решетки — полного давления p_1^* и скорости потока c_1, которые определялись по выходному сечению расчетной области осреднением по расходу.

В качестве результатов расчета определялись и анализировались следующие параметры:

– коэффициент скорости лопаточной решетки:

$$\varphi = \frac{c_1}{c_{1t}};$$

– коэффициент потерь кинетической энергии:

$$\zeta = 1 - \varphi^2.$$

Верификация полученных данных осуществлялась с данными натурного эксперимента [1], представленными в виде зависимости коэффициента потерь кинетической энергии от числа Маха — $\zeta = f(\mathrm{Re})$ для решеток бесконечной высоты.

График расчетных зависимостей $\zeta = f(\mathrm{Re})$, полученные с помощью вышеуказанных CFD-пакетов программ, сравнение с результатами натурного эксперимента приведены на рис. 2.

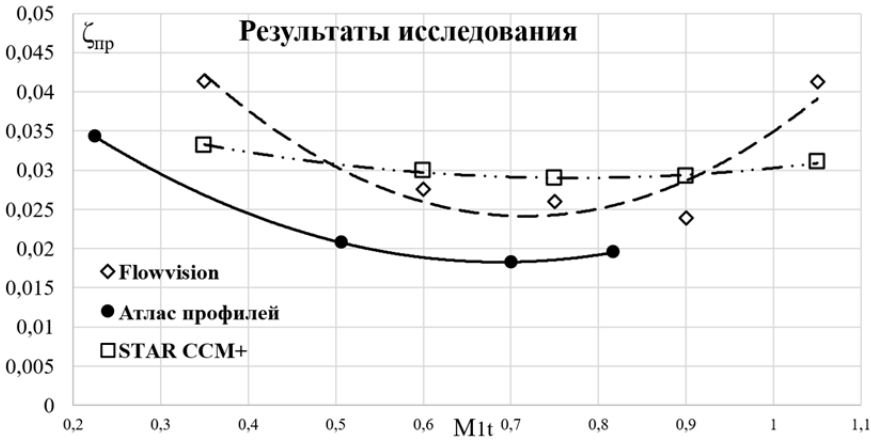


Рис. 2. График зависимости коэффициентов потерь от числа Маха для профиля СА-9015

Выводы. Использование CFD-пакета FlowVision позволило выполнить расчет течения вязкого пара через лопаточную решетку и определить коэффициенты характеризующие потери этого процесса. Найденная в ходе моделирования зависимость $\zeta = f(\mathrm{Re})$ имеет параболический характер и лучше соответствует результатам натурного эксперимента, чем результаты, полученные с помощью STAR CCM+. Ни один из использованных CFD-пакетов не смог обеспечить хорошего соответствия абсолютных результатов расчета коэффициента потерь кинетической энергии данным натурного эксперимен-

та. Однако стоит отметить, что при этом погрешность определения скорости в ходе моделирования составила менее 0,5 %, что можно считать хорошим предварительным результатом. Более достоверные результаты можно получить отказавшись от использования моделей пристеночных функций, перейдя к моделированию при $y^+ < 1$, где будет исследована сходимость по сетке и заранее отстроена расчетная модель, однако это потребует большего количества времени и вычислительных затрат.

Список источников

[1] Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. *Атлас профилей решеток осевых турбин.* Москва, Машиностроение, 1965.

[2] Дорфман Л.А. Исследование натурных ступеней паровых турбин с полным и парциальным подводом. *Энергомашиностроение*, 1956, № 10, с. 18–20.

[3] Афанасьева Н.Н., Бусурин В.Н., Гоголев И.Г. *Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин.* Ленинград, Машиностроение, 1980, 263 с.

[4] Гольцов В.В., Кадетов А.П.Обобщение экспериментальных зависимостей для определения коэффициентов профильных потерь в турбинных решетках. *Труды ЦИАМ*, 1977, № 786, с. 1–3.

[5] Дронник Ю.М. Анализ методов расчета профильных потерь в турбинных решетках. *Энергетическое машиностроение*, 1982, вып. 34, с. 9–14.

[6] Зысина-Моложен Л.М. *Приближенный метод расчета профильных потерь в решетках.* Москва, Энергия, 1960, с. 48–87.

[7] Шубенко-Шубин Л.А., Стоянов Ф.А. Об оценке профильных потерь в турбинной решетке, обтекаемой нестационарным потоком. *Энергомашиностроение*, 1972, № 1, с. 24–28.

[8] *Официальный сайт FlowVision CFD.* URL: https://flowvision.ru/ru (дата обращения 28.10.2025).

Using the FlowVision CAE package to determine losses in steam turbine blade arrays

Zharikov Artem Andreevich artemzhrk@gmail.com
Shevelev Denis Vladimirovich denis.v.shevelev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The purpose of this work was to verify the calculation of profile losses in a blade grid based on the C-9015A profile using the FlowVision CAE package. Verification was carried out by comparing the results of numerical simulation with the data of the field experiment and the results obtained in the STAR CCM+ package. Different turbulence models and boundary layer modeling approaches were used in each package. The obtained dependences of the loss coefficient on the Mach number, calculated in FlowVision and STAR CCM+, are compared with experimental data.

Keywords: *turbine, flow part, thermogasdynamic calculation of the stage, kinetic energy losses, profile losses, numerical modeling*

УДК 621.039.586

Оценка надежности системы аварийного расхолаживания на основе анализа дерева отказов

Петрушин Кирилл Александрович petrushin9ka@mail.ru
Ильичев Владимир Юрьевич patrol8@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен вероятностный анализ безопасности системы аварийного расхолаживания интегрального реактора. На основе построения дерева отказов и использования референтных данных МАГАТЭ показано, что вероятность отказа базовой конфигурации системы составляет 1,6 % за 72 часа, что неприемлемо для систем безопасности АЭС. Показано, что резервирование клапанов снижает вероятность отказа до 0,67 %, а организация двух независимых контуров расхолаживания позволяет достичь показателя 0,0045 %, что соответствует современным требованиям к системам безопасности. Методом Фуссела — Весели выявлены критически важные элементы. Определены перспективные направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: *система аварийного расхолаживания, древо отказов, резервирование, мера Фуссела — Весели, ядерная безопасность*

Обеспечение надежности систем аварийного расхолаживания является критически важной задачей для безопасности атомных энергетических установок. Особую сложность представляют системы с естественной циркуляцией, где работоспособность зависит от множества взаимосвязанных факторов. Интегральные компоновки реакторов, в которых теплообменное оборудование размещено внутри корпуса, создают дополнительные требования к анализу отказоустойчивости.

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) предоставляет инструментарий для комплексной оценки надежности и выявления «слабых звеньев» системы [1].

Основой работы является вероятностный анализ безопасности по методикам МАГАТЭ. Объектом исследования выступила система аварийного расхолаживания представленная на рис. 1, включающая промежуточный пароводяной контур с компенсационной емкостью и автономный контур с естественной циркуляцией.

Методология основана на построении дерева отказов с верхним событием «Невозможность обеспечения требуемого теплосъема в течение 72 часов». Дерево отказов представлено на рис. 2. Логическая структура реализована через операторы «и» и «или»: отказ системы происходит при отказе промежуточного «или» автономного контура, каждый из которых раскладывается на отказы подсистем и компонентов.

Исходные данные надежности компонентов получены из референтных источников МАГАТЭ (TECDOC-478) и отраслевой статистики [2].

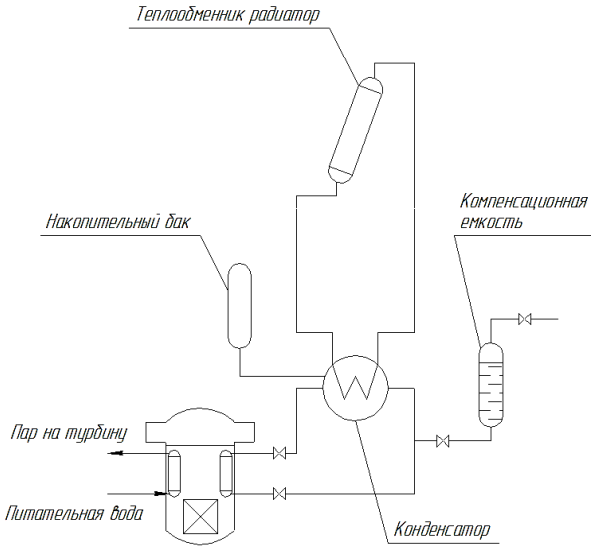


Рис. 1. Упрощенная схема системы аварийного расхолаживания

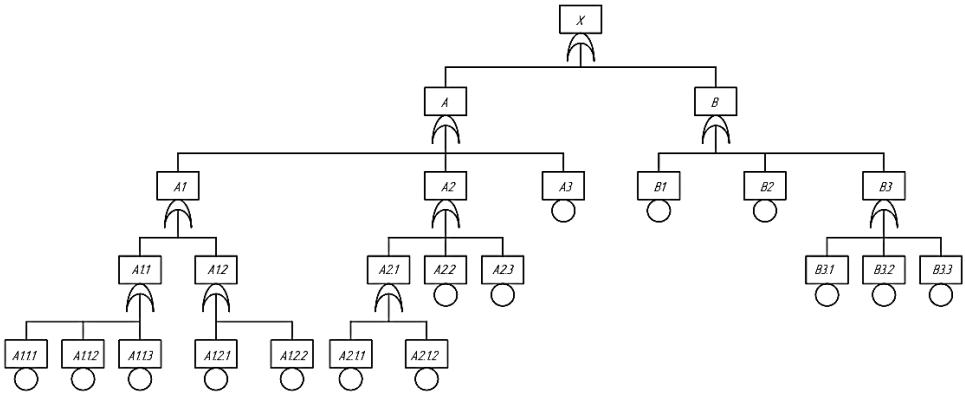


Рис. 2. Дерево отказов системы аварийного расхолаживания

Вероятности отказов пересчитаны для 72-часового периода с использованием экспоненциального закона распределения. Расчет дерева отказов выполнен с применением булевой алгебры, где для операции «или» использована формула [3]:

$$P(A+B)=P(A)+P(B)-P(AB), \quad (1)$$

где $P(A+B)$ — вероятность совместного события; $P(A)$ — вероятность события A; $P(B)$ — вероятность события B.

Расчет вероятности отказа компонентов рассчитывается по формуле:

$$P = 1 - e^{-\lambda T_M}, \quad (2)$$

где λ — интенсивность отказов 1/ч; $T_м$ — интервал времени.

Для выявления критических компонентов использована мера Фуссела — Весели, определяющая вклад каждого элемента в общий риск системы [4]:

$$FV^K = \frac{P_C^K(N) - P_C^K(0)}{P_C^K(N)}, \quad (3)$$

где $P_C^K(N)$ — вероятность отказа системы при номинальном значении вероятности отказа элемента E_K.

Показатель FV^K характеризует относительное увеличение частоты отказа системы при переходе элемента E_K из состояния абсолютной надежности в «номинальное» состояние (состояние, соответствующее регламентируемым нормам) [5].

При базовой конфигурации системы вероятность ее отказа в течение 72 часов составила 1,6 %. Данный показатель является чрезвычайно высоким для системы безопасности атомной энергетической установки и свидетельствует о наличии серьезных уязвимостей в проекте.

Для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на надежность, был проведен анализ важности по методу Фуссела — Весели, который определяет вклад каждого компонента в общий риск системы. Расчеты показали, что наибольшее влияние на надежность оказывают следующие компоненты:

– запорные клапаны А.2.1, А.2.2 и А.2.4 — совокупный вклад 29,6 %;
– теплообменник-конденсатор В.1 — вклад 8,7 %;
– клапан компенсационной емкости А.1.1 — вклад 3,1 %;
– образование газового кармана А.1.5 — вклад 1,2 %.

Для такого оборудования, как запорные клапаны, обычно применяется резервирование, что является стандартной практикой в системах безопасности АЭС. Это требование обусловлено критической важностью данных компонентов для выполнения защитных функций и подтверждено многолетним опытом эксплуатации атомных станций.

Принцип резервирования реализуется через создание параллельных независимых каналов, где отказ одного элемента не приводит к потере функции всей системы. В данном случае для критических запорных клапанов А.2.1, А.2.2 и А.2.4 было применено двойное резервирование (2×100 %), при котором каждый клапан дублируется независимым аналогом с автоматическим переключением при отказе основного элемента.

Математически эффект от резервирования объясняется изменением логики работы системы: если в базовой конфигурации отказ одного клапана приводил к нарушению функции, то после резервирования для отказа функции требуется одновременный отказ как основного, так и резервного клапана. Вероятность такого события рассчитывается как произведение вероятностей отказов отдельных компонентов.

После введения двойного резервирования критических клапанов вероятность отказа системы снизилась с 1,6 до 0,67 %, что демонстрирует почти трехкратное улучшение надежности.

В соответствии с современными требованиями к безопасности, такие критически важные системы обычно выполняют в несколько независимых каналов. Этот принцип многоканальности является фундаментальным в проектировании систем безопасности АЭС и закреплен в международных стандартах МАГАТЭ и национальных нормативных документах.

Организация двух независимых контуров расхолаживания предполагает создание полностью автономных систем, каждая из которых способна самостоятельно обеспечить 100 % требуемого теплоотвода.

Вероятностный анализ показал, что при организации двух независимых контуров (при условии уже реализованного резервирования клапанов) вероятность отказа системы снижается до 0,0045 %. Это значение демонстрирует повышение надежности на три порядка по сравнению с базовой конфигурацией.

Достигнутый уровень надежности 0,0045 % соответствует целевому показателю для систем безопасности АЭС и подтверждает эффективность принципа многоканальности как ключевого подхода к обеспечению безопасности атомных энергетических установок.

Вероятностный анализ безопасности системы аварийного расхолаживания интегрального реактора показал, что при базовой конфигурации вероятность отказа системы за 72 часа составляет 1,6 %, что неприемлемо для систем безопасности АЭС. Анализ важности выявил критически уязвимые элементы: запорные клапаны промежуточного контура (29,6 % вклада) и теплообменник-конденсатор (8,7 % вклада). Стандартное резервирование клапанов снизило вероятность отказа до 0,67 %, однако наиболее эффективным решением оказалась организация двух независимых контуров расхолаживания, позволившая достичь показателя 0,0045 %, что соответствует современным требованиям к системам безопасности. Перспективой для дальнейших исследований является учет человеческого фактора, пожаров и сейсмических воздействий, что позволит создать комплексную модель надежности, адекватно отражающую реальные условия эксплуатации.

Список источников

[1] Швыряев Ю.В. *Применение ВАБ для выработки и принятие решений по повышению безопасности действующих и проектируемых АЭС с реакторами ВВЭР/МАГАТЭ*. Вена, 2001, 33с.

[2] *Общие положения обеспечения безопасности атомных станций* ОПБ-88.97 ПН-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-87). Москва, Энергоатомиздат, 1998, 68 с.

[3] Клемин А.И. *Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов.* Москва, Атомиздат, 1973, 304 с.

[4] Fussel J.B. How to Hand-Calculate system reliability characteristics. *IEEE Transactions on Reliability*, 1973, no. 3, r. 24.

[5] Серебровский А.Н. Методические и вычислительные аспекты значимости риска компонентов сложных систем. Ч. I. *Математические машины и системы*, 2012, № 2, с. 145–154.

Assessing the reliability of the emergency cooldown system based on fault tree analysis

Petrushin Kirill Aleksandrovich petrushin9ka@mail.ru
Ilyichev Vladimir Yuryevich patrol8@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A probabilistic safety analysis of the emergency cooldown system of an integral reactor was conducted. Based on the construction of a fault tree and the use of IAEA reference data, it was shown that the probability of failure of the basic system configuration is 1.6 % over 72 hours, which is unacceptable for NPP safety systems. Valve redundancy was shown to reduce the probability of failure to 0.67 %, while the use of two independent cooldown circuits allows for a failure rate of 0.0045 %, which meets modern safety system requirements. Critical elements were identified using the Fussell — Vesseli method. Promising areas for further research have been identified.

Keywords: *emergency cooldown system, fault tree, redundancy, Fussell — Veseli measure, nuclear safety*

УДК 536.24

К вопросу моделирования сопряженного теплообмена методами численного эксперимента

Шевелев Денис Владимирович denis.v.shevelev@bmstu.ru
Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследовано влияние густоты расчетной сетки на результаты численного моделирования обтекания круглого цилиндра воздушным потоком при сопряженном теплообмене в CFD-пакете Flow Vision. Определена погрешность нахождения коэффициента теплоотдачи методами численного эксперимента сравнением с экспериментальными данными. Отмечено, что увеличение густоты расчетной сетки не всегда приводит к увеличению точности моделирования. Даны рекомендации по выбору конфигурации расчетной сетки. Полученные результаты могут быть полезны при численном моделировании воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратов с поперечным обтеканием трубных пучков.

Ключевые слова: *конвективный теплообмен, коэффициент теплоотдачи, моделирование, CFD, расчетная сетка, Flow Vision*

Современные CFD-пакеты — это мощные программные комплексы, предназначенные для численного моделирования течения жидкостей и газов, а также сопутствующих процессов — процессов теплообмена, химического реагирования, конденсации, испарения, абляции и др.

Использование CFD-пакетов в процессе инженерной разработки позволяет существенно уменьшить количество натурных испытаний. Например, при проектировании теплообменного оборудования они позволяют определить картину течения при обтекании теплообменных поверхностей, найти зоны вихреобразования и застойные зоны, ухудшающие процесс теплообмена. Анализ выявленных особенностей течения потенциально может выполнить оптимизацию и улучшение первоначальной конструкции теплообменного аппарата.

В настоящее время существует большое количество CFD-пакетов разного уровня сложности, стоимости и доступности, что предопределяет их широкое использование в широких инженерных кругах.

Следует отметить, что несмотря на то, что CFD-пакет всегда выдает определенный результат — набор полей термодинамических и кинематических параметров потока, интегральных характеристик течения, не всегда эти результаты соответствуют реальной физической картине. В основе работы любого CFD-пакета лежит численное решение дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости (уравнений Навье — Стокса), дополненных вспомогательными уравнениями сохранения энергии и массы, а также граничными условиями. Особую роль играют математические модели турбулентности,

с помощью которых отпадает необходимость детального расчета мелких вихревых структур, что требует больших, а порой и запредельных вычислительных ресурсов.

Пользователь CFD-пакета невысокой квалификации зачастую использует настройки расчетных моделей, выставленные изначально «по умолчанию». Обычно в большинстве случаев используется k–e модель турбулентности как одна из разновидностей RANS модели. К ее преимуществам относится устойчивость в расчетах, хорошая сходимость, экономичность, что делает ее одной из самых удобных моделей в общих инженерных расчетах. Однако, несмотря на определенную универсальность, использование данной модели может дать в ряде случаев неточный и даже неверный результат моделирования. K-e модель турбулентности не может рассчитывать ламинарные течения и очень чувствительна к густоте сетки в пристеночной области. Желая получить более точный результат, недостаточно опытный пользователь CFD-пакета стремится сделать расчетную сетку более детальной, считая, что это позволит разрешить больше особенностей течения, но не всегда это приносит положительный результат, что отмечено в работе [1].

Рассмотрена задача сопряженного теплообмена трубы наружного диаметра $d_н$ = 40 мм плоскопараллельным потоком воздуха со скоростью c = = 7,53 м/с (Re = 20 000). Температура внутренней стенки трубы $t_{вн.ст}$ = 60 °С, температура воздушного потока $t_в$ = 20 °С.

Целью расчета ставилось определение коэффициента теплоотдачи, как одного из важнейших параметров процесса теплообмена:

$$\alpha = \frac{q}{t_{ст} - t_в},$$

где q — плотность теплового потока от наружной стенки трубы; $t_{ст}$ — температура наружной стенки — «штатный» параметр; $t_в$ — температура набегающего воздуха.

Согласно [2], коэффициент теплоотдачи при обтекании цилиндра для условий поставленной задачи и полученный путем решения критериального уравнения составляет величину α =54 Вт/(м^{2}К).

Использовались и сравнивались результаты моделирования в двух CFD-пакетах:

– SolidWorks Flow Simulation — интегрированный в CAD CFD-пакет оптимизированный для работы инженеров-конструкторов, а не CFD-специалистов [3]. Он характеризуется отсутствием тонких настроек, но относительно прост и понятен в использовании;

– Flow Vision — CFD-пакет российской разработки [4]. Он обладает, по сравнению с SolidWorks Flow Simulation, большим числом физических моделей и возможностью тонких настроек, но более сложен в освоении.

Для решения задачи сопряженного теплообмена настройки CFD-пакетов были оставлены «по умолчанию» — использовались уравнения Навье — Сток-

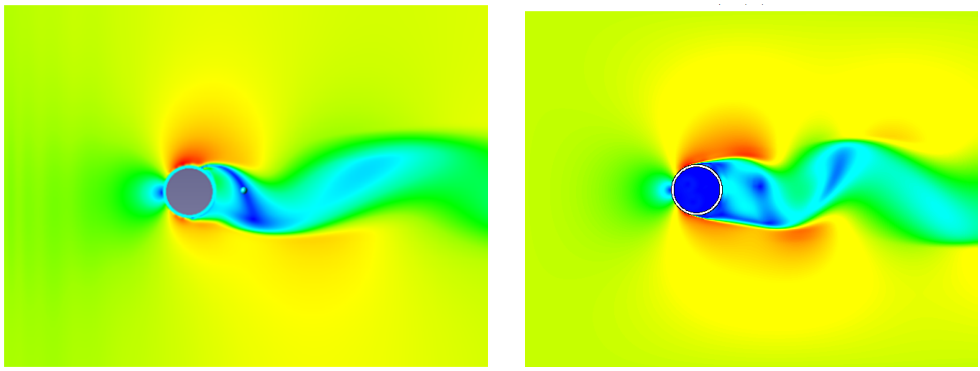
са + *k*–е модель турбулентности. Рассмотрены шесть вариантов расчетных сеток двумерной расчетной области 360×280 мм, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Исследованные варианты сетки

Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Сетка	100×78	200×156	300×233	400×310	500×388	300×234 +адаптация по поверхности

Визуально картина обтекания трубы потоком получена практически одинаковая, начиная с варианта 3 и выше наблюдается отрывное обтекание цилиндра с формированием за ним дорожки кармана (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Мгновенные картины обтекания трубы потоком воздуха (поле скоростей): *а* — Flow Vision; *б* — Solid Works Flow Simulation

Результаты определения коэффициента теплоотдачи, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численного моделирования

Номер варианта		1	2	3	4	5	6
Параметр	*y*+	50	28	21	15	12	5
Flow Simulation	α	51	55	60	57	53	66
Flow Vision	α	42	54	65	68	73	91

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, корректность результатов численного моделирования сильно зависит от параметров расчетной сетки. Величина погрешности определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от номера варианта (густоты) базовой расчетной сетки приведена на рис. 2.

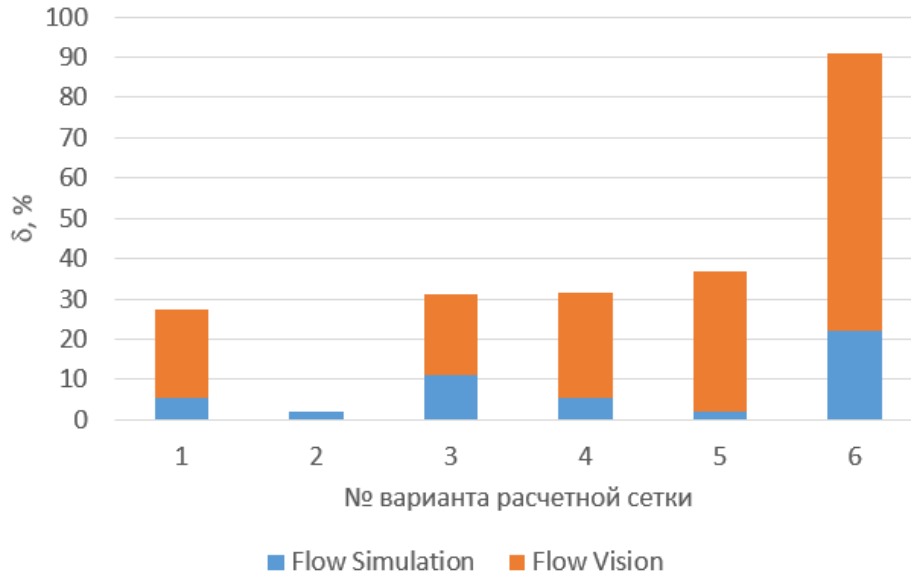


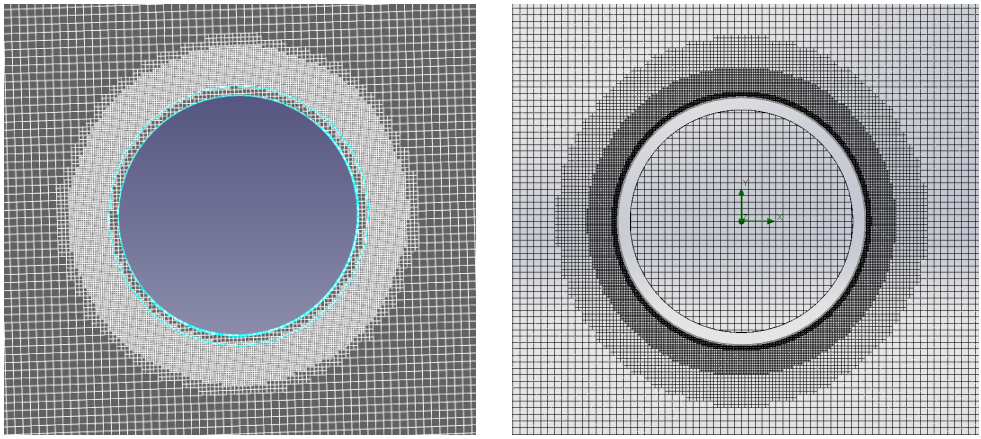
Рис. 2. Зависимость величины погрешности определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от номера варианта (густоты) базовой расчетной сетки

Как следует из рис. 2, наиболее корректный результат моделирования в обоих CFD-пакетах был получен для варианта 2 — достаточно редкой расчетной сетки. Дальнейшая ее детализация для Flow Vision значительно ухудшала результат, а для Flow Simulation точность моделирования оказалась непредсказуема, но более точна чем в Flow Vision. По-видимому, это объясняется тем, что в Flow Simulation используется не чистая k-e модель турбулентности, а гибридная, в которой, по скрытым внутренним алгоритмам программы возможно подключение LVEL модели и стандартных пристеночных функций.

Особо следует отметить, значительное ухудшение результата моделирования при адаптации расчетной сетки по наружной поверхности трубы — вариант № 6 (рис. 3).

Этот парадоксальный, на первый взгляд, результат объясняется тем, что для рассмотренных вариантов 3–6 безразмерное расстояние $y+$ от стенки до первого узла сетки менее 30 и, в этом случае, стандартная k-e модель не может корректно разрешить тонкую структуру потока в непосредственной близости от стенки. Для этой модели, в идеале, величина $y+$ для сетки у поверх-

ности цилиндра должна лежать в диапазоне от 30 до 100 [5]. Ухудшение результата моделирования для варианта 1 расчетной сетки связано с неудовлетворительной детализацией основного потока, обтекающего трубу.



а *б*

Рис. 3. Конфигурация для варианта № 6 расчетной сетки:
а — Flow Vision; б — Flow Simulation

Выводы. Показано, что конфигурация расчетной сетки играет одну из важнейших ролей в процессе CFD-моделирования сопряженного теплообмена. Неправильный выбор расчетной сетки может на десятки процентов ухудшить результат, сделав его малопригодным для дальнейшего анализа. Детализацию расчетной сетки следует выбирать исходя особенностей геометрии расчетной области и выбранной модели турбулентности. При необходимости детального исследования пристеночных характеристик течения следует отказаться от грубой *k*–е модели турбулентности в пользу более точной модели *k*-omega SST способной разрешать ламинарный пограничный подслой. Использовать результаты моделирования газодинамических задач в Flow Simulation следует лишь для грубого решения оценочных задач, ввиду непредсказуемой точности получаемых результатов. Результаты моделирования в любом CFD-пакете требуют обязательной верификации.

Список источников

[1] Жинов А.А., Шевелев Д.В., Юрик Е.А. Использование технологии CFD для моделирования конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндра. *Наука, техника и образование*, 2023, № 44, с. 11–20.

[2] Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник.* Москва, Энергоиздат, 1982, 512 с.

[3] *Официальный сайт Siemens Solid Works Flow Simulation.* URL: https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation (дата обращения 28.10.2025).

[4] *Официальный сайт FlowVision CFD.* URL: https://flowvision.ru/ru/ (дата обращения 28.10.2025).

[5] Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD.* DCW Industries, 2006.

On the issue of modeling coupled heat transfer by numerical experimental methods

Shevelev Denis Vladimirovich **denis.v.shevelev@bmstu.ru**

Zhinov Andrey Alexandrovich **azhinov@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The effect of the density of the computational grid on the results of numerical simulation of the airflow around a circular cylinder during coupled heat exchange in the CFD Flow Vision package is investigated. The error of finding the heat transfer coefficient by numerical experimental methods is determined by comparison with experimental data. It is noted that an increase in the density of the computational grid does not always lead to an increase in the accuracy of modeling. Recommendations on the choice of the computational grid configuration are given. The results obtained can be useful in numerical modeling of air-cooled heat exchangers with transverse flow around tube bundles.

Keywords: *convective heat transfer, heat transfer coefficient, modeling, CFD, calculation grid, Flow Vision*

УДК 621.63

Тенденции и приоритеты при проектировании питательных насосов

Рожкова Анжелика Алексеевна rozhkovaaa@student.bmstu.ru
Савин Владимир Юрьевич savinvu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены современные тенденции и приоритеты в проектировании питательных и многоступенчатых насосов для энергетической отрасли. Проанализированы ключевые требования к насосам: обеспечение долговечности, герметичности, динамической устойчивости и ремонтопригодности. Описаны конструктивные особенности современных насосов, включая преимущества двухкорпусного исполнения, материалы основных деталей, виды концевых уплотнений и методы балансировки ротора. Особое внимание уделено вопросам виброустойчивости и форме напорной характеристики. Рассмотрена новая конструкция направляющего аппарата, позволяющая влиять на форму характеристики и снижать вибрации.

Ключевые слова: *питательный насос, многоступенчатый насос, конструкция насоса, направляющий аппарат, вибрация насосов, гидродинамическая пята, концевые уплотнения, балансировка ротора, напорная характеристика*

Питательные насосы являются важным компонентом в составе ПТУ. Рост единичной мощности энергоустановок атомных и тепловых электростанций обуславливает увеличение мощностных показателей питательных насосов. На крупных энергоблоках доля мощности, потребляемой этими насосами, достигает 4–8 % от общей мощности блока.

Конструктивное исполнение современных питательных насосов должно соответствовать ряду ключевых требований: обеспечивать продолжительный срок службы (не менее 30 000 часов) [1] без необходимости замены основных компонентов и значительного ухудшения рабочих параметров; гарантировать полную внешнюю герметичность и отсутствие утечек в зонах уплотнительных соединений; отличаться удобством при сборке, разборке и техническом обслуживании.

Для выполнения указанных требований был проведен значительный объем экспериментальных исследований исследовательскими коллективами [2]. К наиболее важным из них можно отнести: создание высокоэффективных рабочих колес с быстроходностью n_s = 70–150, обладающих непрерывнопадающей напорной характеристикой; разработку первых ступеней с повышенной всасывающей способностью; изучение виброустойчивости роторов для насосов со скоростью вращения выше 3000 об/мин; а также проектирование надежных конструкций концевых уплотнений вала [3].

Основной несущей конструкцией насоса служит наружный корпус, изготовленный из кованого цилиндра углеродистой стали. Опорные поверхности лап корпуса располагаются в строго горизонтальной плоскости, совпадающей

с осью насоса. Возможность теплового перемещения корпуса в сторону напорной крышки обеспечивается за счет жесткого крепления лап со стороны входа и наличия технологического зазора между лапами и дистанционными втулками. Правильное осевое позиционирование корпуса при расширении контролируется двумя продольными шпонками, установленными в его нижней части [1].

Современные многоступенчатые насосы, работающие на воде, используют два основных типа концевых уплотнений: жесткие уплотнения с подводом запирающего конденсата температурой до 50 °С от напорной магистрали конденсатных насосов; и уплотнения с мягкой сальниковой набивкой.

Выбор конкретного типа уплотнения определяется конструктивными особенностями и условиями эксплуатации насоса. Например, в двухкорпусных насосах моделей ПЭ580-185/200-2, ПЭ600-300 и других применяются щелевые уплотнения с подачей холодного запирающего конденсата [4]. Щелевое уплотнение с подачей холодного конденсата — это система, создающая барьер, не допускающая прорыва горячей воды из насоса наружу, используя для этого столб более холодной и чистой воды. В кольцевую камеру уплотнения, расположенную со стороны полости насоса, непрерывно подается холодный конденсат под давлением, которое на 0,3–0,7 МПа превышает давление в полости насоса в этом месте. Это давление контролируется редукционным клапаном. Подача конденсата под повышенным давлением создает непреодолимый гидравлический барьер. Горячая вода из насоса физически не может преодолеть поток, направленный навстречу, и просочиться наружу. Таким образом, система работает по принципу «разделения сред»: горячая вода остается внутри, а наружу выходит только холодный, контролируемый поток конденсата в дренаж. Конструктивно такое уплотнение представляет собой набор нескольких неподвижных колец (втулок), запрессованных в корпус уплотнения и образующих с валом очень маленький радиальный зазор — обычно в пределах 0,2–0,4 мм.

Хотя такая система несколько снижает экономичность энергоблока из-за расхода конденсата, она обладает существенными преимуществами перед сальниковыми уплотнениями: срок службы этих уплотнений практически соответствует ресурсу основных деталей насоса; они требуют меньшего обслуживания в процессе эксплуатации. Поскольку щелевые уплотнения чувствительны к попаданию твердых частиц, на линии подвода конденсата обязательно устанавливаются фильтры преимущественно Y-образной или Т-образной конструкции. Y-образные фильтры компактны и обладают меньшим гидравлическим сопротивлением, что делает их удобными для монтажа в стесненных условиях. Их фильтрующим элементом является цилиндрическая сетка из нержавеющей стали. Т-образные фильтры, имея большие габариты, предоставляют значительно большую площадь фильтрующей поверхности и объем отстойника для сбора шлама, что увеличивает межсервисные интервалы и упрощает процедуру очистки. Ключевым параметром фильтрующей сетки является размер ячейки, который для данных систем обычно со-

ставляет от 50 до 150 микрон. Такой подбор обусловлен тем, что частицы размером даже 100–150 микрон, многократно проходя через зазор в 300 микрон, способны нанести существенный абразивный ущерб, поэтому фильтр должен надежно отсекать всю фракцию, способную к такому воздействию. Материалом для корпуса фильтра служит углеродистая или нержавеющая сталь, а фильтрующий элемент изготавливается исключительно из коррозионно-стойкой стали [5].

Изготовление рабочих колес осуществляется методом точного литья. Для предотвращения протечек через зазор между колесом и валом используется торцевое контактное уплотнение.

Возникающее в процессе работы осевое усилие ротора компенсируется гидравлической пятой, с отводом воды из разгрузочной камеры в деаэратор или входной трубопровод.

Детали насоса, образующие уплотнительные щели, переднего и межступенчатого рабочих колес, гидравлической пяты, концевых уплотнений, выполняются из хромистой стали марок 2Х13 и 3Х13 с твердостью HRC 30–35 (роторные детали) и HRC 38-45 (статорные детали).

Для возможности уменьшения зазоров в проточной части и увеличения экономичности насоса при сохранении его надежности в эксплуатации разработаны специальные материалы — высокохромистые чугун и сталь для работы в узлах уплотнений совместно со сталью 2Х13 и 3Х13. Опытная эксплуатация насосов с уплотнениями из специального материала на электростанциях показала хорошие эрозионностойкие качества [6].

Высокая частота вращения ротора обусловливает жесткие требования к его балансировке. Перед сборкой ротора каждое рабочее колесо балансируют статически в динамическом режиме.

В последнее время появляется большое количество работ по борьбе с вибрациями насоса. При снижении вибрации увеличивается надежность и долговечность насосов и улучшаются условия работы для обслуживающего персонала [7].

Вибрация насосов имеет гидродинамическую природу, поэтому различные способы борьбы с ней приводят, как правило, к снижению КПД насоса.

Одновременное выполнение всех требований (обеспечение высокой экономичности, непрерывно-падающей или даже линейной характеристики и малых уровней вибрации) является невозможным, так как мероприятия, способствующие улучшению одного из показателей, чаще всего находятся в противоречии с обеспечением других. Разработана конструкция направляющего аппарата, позволяющая в определенной степени обеспечить все вышеперечисленные требования [8].

Ступень насоса с направляющим аппаратом (рис. 1), состоящим из двух половин, отделенных друг от друга плоской перегородкой, позволяет раздельно профилировать обе половины в соответствии с возможными схемами течения жидкости (рис. 2) в колесе на разных подачах и тем самым влиять на форму напорной характеристики.

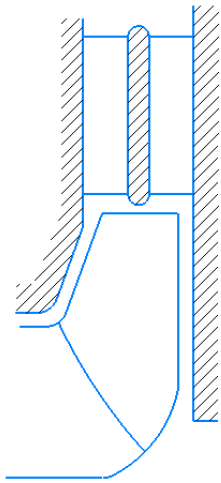


Рис. 1. Направляющий аппарат

В режиме оптимальных расходов поверхности тока в направляющем аппарате совпадают с плоскостью перегородки; дополнительные гидравлические потери, вносимые перегородкой, в этом случае несущественны.

Эффективность использования рассматриваемого направляющего аппарата будет возрастать на ступенях с большей шириной канала на выходе из колеса, так как в этом случае стеснение потока перегородкой будет уменьшаться.

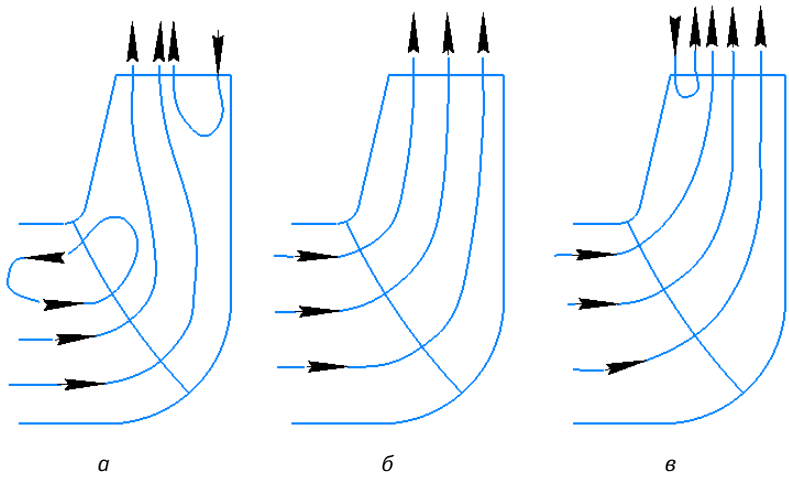


Рис. 2. Схема течения жидкости через колесо:
а — $Q < Q_{ном}$; *б* — $Q = Q_{ном}$; *в* — $Q > Q_{ном}$

Таким образом, проектирование питательных насосов является сложной многоуровневой задачей, требующей комплексного подхода к вопросам энергетической эффективности, герметичности, надежности и т. д.

Список источников

[1] Бойко Е.А. *Эксплуатация теплоэнергетического оборудования.* Красноярск, ИПЦ КГТУ, 2025, 600 с.

[2] Галашов Н.Н. *Тепломеханическое и вспомогательное оборудование электростанций.* Томск, Изд-во ТПУ, 2010.

[3] Бедчер Ф.С., Ломакин А.А. *Определение критического числа оборотов ротора насоса с учетом сил, возникающих в уплотнениях.* Москва, Машгиз, 1957.

[4] Боревский Е.И., Жижокин В.Г. *Концевые уплотнения плавающего типа для высокооборотных питательных насосов ТЭС*. Москва, Энергомашиностроение, 1972.

[5] Локалов Г.А., Марковский В.М. *Осевые и центробежные насосы тепловых электрических станций.* Екатеринбург, Уральский федеральный университет, 2016, 140 с.

[6] Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. *Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы.* Москва, Машиностроение, 1970.

[7] Циммерман С.Д., Анкудинов А.А., Васин В.А. Основные направления развития гидромашиностроения на Калужском турбинном заводе. *Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение*, 2005, вып. 6, № 1, с. 58–63.

[8] Марцинковский В.А. *Гидродинамика и прочность центробежных насосов.* Москва, Машиностроение, 1970.

Trends and priorities in the design of feed pumps

Rozhkova Anzhelika Alekseevna rozhkovaaa@student.bmstu.ru
Savin Vladimir Yurievich savinvu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

Current trends and priorities in the design of feed and multistage pumps for the energy industry are considered. The key requirements for pumps are analyzed: ensuring durability, tightness, dynamic stability and maintainability. The design features of modern pumps are described, including the advantages of double-hull design, materials of the main parts, types of end seals and methods of balancing the rotor. Special attention is paid to the issues of vibration resistance and the shape of the pressure characteristic. A new design of the guiding device is considered, which makes it possible to influence the shape of the characteristics and reduce vibrations.

Keywords: *feed pump, multistage pump, pump design, guiding device, pump vibration, hydrodynamic heel, end seals, rotor balancing, pressure characteristics*

УДК 621.592.3

Сравнительный анализ характеристик турбины центростремительного и осевого типа детандер-компрессорного агрегата

Резчиков Владислав Русланович vladislavrezcikov2011@gmail.com
Шевелев Денис Владимирович denis.v.shevelev@bmstu.ru
SPIN-код: 2076-0373

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено применение детандеров в промысловой подготовке газа. Рассмотрена конденсация влаги методом низкотемпературной сепарации. Особое внимание уделено преимуществам и недостаткам применения детандеров для осушения газа. Проанализированы получившиеся характеристики двух турбин и их эффективность применения в газовых месторождениях, из этого сделан вывод о целесообразности использования осевого и центростремительного детандера для этого типа работы.

Ключевые слова: *детандер, низкотемпературная сепарация, газовая промышленность, природный газ, промысловая подготовка газа*

Природный и попутный газ имеют различный углеводородный состав, но могут содержать капельную влагу, сероводороды, азот, углекислый газ и другие газы. Влага, образуя с углеводородами газогидраты, снижает пропускную способность трубопроводов. Сероводород и диоксид углерода вызывают интенсивную коррозию оборудования, труб и арматуры. Задачей промысловой подготовки газа является его очистка от механических примесей, тяжелых углеводородов, паров воды, сероводорода и диоксида углерода [1].

При извлечении газа из недр получают газ с давлением, превышающим допустимое значение для подачи в магистральные газопроводы. Избыток давления используют для охлаждения добываемого газа в детандере — устройстве, в котором за счет расширения газа можно получить газ с более низкими давлением и температурой.

Турбодетандер может выполнять несколько функций, главная из которых — понижение давления, вторичные могут различаться в зависимости от заданных характеристик. Осушение газа является одной из таких функций. Детандер использует метод низкотемпературной сепарации, при этом способе необходимо понизить температуру газа до определенного значения [2].

Турбодетандеры подразделяют на две основные группы: центростремительные и осевые. Центростремительные турбодетандеры, в свою очередь, подразделяются на радиальные, радиально-осевые и диагональные [3]. Цель данной работы заключается в исследовании и анализе характеристик турбины центростремительного и осевого типа детандер-компрессорного агрегата. Это важно для компаний, связанных с газом: от газовых месторождений до установок производства сжиженного газа.

Первоочередной задачей проектирование турбодетандерного агрегата заключается в определении эффективности, а также конструктивных характеристик турбинной ступени машины. Одним из основных параметров является частота вращения вала турбодетандера, которая определяет конструкцию детандера. Подбирая правильные значения, возможно обеспечить более высокую эффективность машины [4].

При одинаковых начальных условиях, детандеры можно сравнить по следующим характеристикам:

– габариты;
– вес;
– производительность;
– эффективность;
– цена;
– область применения.

Центростремительные детандеры. Извлечение влаги из природного газа происходит следующим образом. По мере снижения температуры газа в детандере водяной пар достигает точки росы и конденсируется. Центростремительное движение потока помогает отделить влагу от молекул газа, предотвращая повторное смешивание с газом. После чего конденсат отводится из системы.

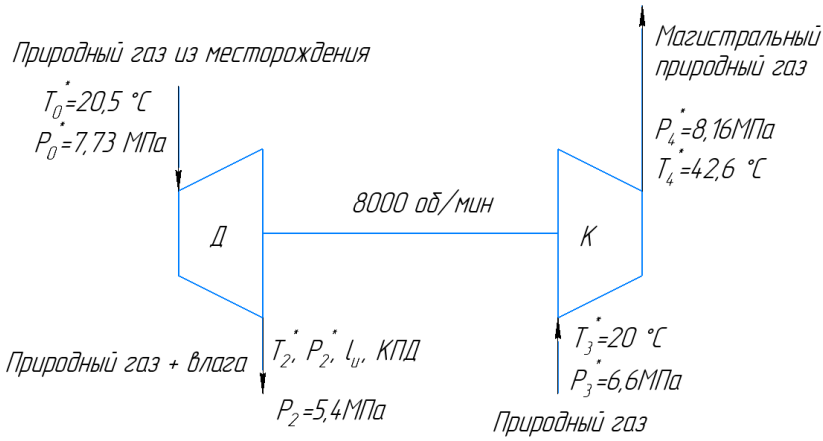
Центростремительные детандеры обладают рядом преимуществ перед осевыми. Они выигрывают в компактности, устойчивости к механическим повреждениям и экономии энергоресурсов, но уступают в производительности. Их проще проектировать, так как практически все проектируемые центростремительные агрегаты одноступенчатые. Однако трудности возникают при производстве, так как создание сложных рабочих колес центростремительных детандеров обходится дорого и труднее, чем у осевых.

Осевые детандеры работают аналогично центростремительным, однако поток движется вдоль оси вращения, практически не имея радиального движения. Они обладают большей производительностью, чем центростремительные. Простая конструкция делает возможным легкий монтаж, простую замену изношенных частей и удобную эксплуатацию. При одинаковых исходных характеристиках осевые детандеры крупнее центростремительных. Более эффективны при высоком расходе и значительном уровне расширения. Изменение режима работы требует остановки агрегата, что снижает гибкость использования.

Сравним характеристики детандеров, использующихся как представлено на рисунке.

Если сравнивать осевые и центростремительные детандеры с частотой вращения вала 8000 об/мин, начальной температурой 20,5 °С и давлением 7,73 МПа, а также одинаковым статическим давлении на выходе 5,4 МПа, и одинаковым теплоносителем — природный газ. То получается, что центростремительный радиальный детандер оказывается одноступенчатым с внешним радиусом рабочего колеса 0,477 м, конечная полная температура –4 °С,

полное давление на выходе 5,46 МПа. Осевой детандер требует минимум двух ступеней при заданных параметрах. Поскольку при проектировании одноступенчатого варианта высота лопатки становится меньше одного сантиметра, это сильно осложняет создание такой конструкции. Двухступенчатая версия имеет внешний диаметр 0,336 м и конечную полную температуру – 3,75 °С. Полное давление на выходе 5,5 МПа. Расчеты показали, что КПД осевого детандера оказалось ниже, чем у центростремительного.



Упрощенная схема детандер-компрессорной установки

Таким образом, каждый тип детандера имеет свои преимущества и недостатки, которые лучше себя проявляют в определенных обстоятельствах. Для применения на месторождениях газа при низкотемпературной сепарации лучше подходит осевой детандер, так как он способен обрабатывать большие объемы газа. Однако он склонен к проблемам с коррозией, что требует использования более дорогих, устойчивых материалов. Если же применять центростремительный детандер, потребуется установить несколько таких агрегатов или увеличить частоту вращения вала, чтобы достичь той же производительности, что и у осевого. Если же объем обрабатываемого газа невелик, то лучше подойдет центростремительный детандер, который отличается компактностью и большей устойчивостью к коррозии.

Список источников

[1] Соловьянов А.А., Тетельмин В.В., Язев В.А. *Попутный нефтяной газ. Технология добычи, стратегия использования.* Долгопрудный, ИД «Интелект», 2013, 208 с.

[2] Голубева И.А., Мещерин И.В., Родина Е.В. *Газоперерабатывающие предприятия России.* Санкт-Петербург, Лань, 2025, 456 с.

[3] Данилов М.М., Апицына О.С. *Турбомашины низкотемпературных систем.* Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2021, 71 с.

[4] Антонов А.Н., Архаров А.М., Архаров И.А. *Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 533 с.

Comparative analysis of the characteristics of a centripetal and axial flow turbine of an expander-compressor unit

Rezchikov Vladislav Ruslanovich vladislavrezcikov2011@gmail.com
Shevelev Denis Vladimirovich denis.v.shevelev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The use of expanders in field gas processing is discussed. Moisture condensation using low-temperature separation is examined. Particular attention is paid to the advantages and disadvantages of using expanders for gas dehydration. The resulting characteristics of two turbines and their effectiveness in gas fields are analyzed, leading to the conclusion that axial and centripetal expanders are appropriate for this type of operation.

Keywords: *expander, low-temperature separation, gas industry, natural gas, field gas treatment*

УДК 621.438

Исследование влияния различных покрытий на эрозионный износ вставок соплового аппарата

Краснов Андрей Витальевич andreykrasnow@icloud.com
Шевелев Денис Владимирович denis.v.shevelev@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена проблема эрозионного износа вставок соплового аппарата газотурбинных установок вызываемого касательным воздействием кварцевой пыли при высоких температурах. Представлен комплексный подход к оценке пылевой стойкости, включающий классификацию типов пыли, анализ недостатков традиционных испытательных методик и обоснование параметров лабораторных испытаний. Для сравнительной оценки эффективности защитных решений запланированы испытания трех вариантов образцов — без покрытия, с алитированием и с керамическим покрытием на основе оксида титана и алюминия (TiAlO) — в условиях, имитирующих реальную эксплуатацию. Полученные результаты позволят повысить ресурс ГТУ, эксплуатируемых в пустынных и промышленных регионах.

Ключевые слова: *пылевая стойкость, сопловой аппарат, абразивный износ, защитное покрытие, кварцевая пыль, газотурбинная установка, алитирование, TiAlO*

Газотурбинные установки (ГТУ) в условиях повышенной запыленности подвергаются интенсивному абразивному износу и отложению пыли, что приводит к существенному снижению их коэффициента полезного действия (КПД), ресурса и общей надежности. Особенно уязвимыми элементами проточной части являются вставки соплового аппарата, на которые пылевые частицы воздействуют преимущественно по касательной траектории. Такой характер воздействия вызывает локальный износ материала в центральной части профиля, нарушая его геометрию и аэродинамические характеристики [1].

Для повышения стойкости таких деталей широко применяются различные защитные покрытия. Однако их эффективность в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным, требует детальной экспериментальной оценки. Природные пыли, попадающие в проточную часть ГТУ, по характеру их воздействия условно делятся на две основные группы. К первой группе относятся кварцевые пыли, характеризующиеся высоким содержанием SiO_2. Такие пыли вызывают преимущественно абразивный износ за счет механического истирания поверхностей вставок соплового аппарата. Последствиями такого износа являются искажение профилей лопаток, снижение КПД установки, повышение температуры выходящих газов и ухудшение устойчивости компрессора.

Ко второй группе относятся лессовые (глинистые) пыли, которые при температурах газа выше 1000 °C начинают спекаться и образуют твердый керамоподобный налет на поверхностях соплового и рабочего колеса. Это

приводит к уменьшению проходных сечений, нарушению аэродинамики газового потока, снижению развиваемой мощности и, в ряде случаев, к неустойчивой работе ГТУ [2]. Несмотря на наличие обширных исследований по пылевой стойкости ГТУ в целом, остается недостаточно изученным вопрос эффективности защитных покрытий именно на вставках соплового аппарата, подвергающихся интенсивному касательному воздействию абразивных частиц. В связи с этим особую актуальность приобретает целенаправленная оценка эрозионной стойкости различных типов покрытий в лабораторных условиях, имитирующих реальные режимы работы.

Целью настоящего исследования является экспериментальная оценка эрозионной стойкости трех типов образцов:

– без защитного покрытия (базовый вариант);

– с аллитированным покрытием;

– с износостойким покрытием на основе оксида титана и алюминия (TiAlO) [3].

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

– разработать методику лабораторных испытаний, максимально имитирующую реальные условия эрозионного износа в ГТУ;

– провести сравнительные испытания указанных образцов с использованием кварцевого песка в качестве абразива; оценить влияние рабочих температур (до 850 °C) на эффективность защитных покрытий;

– количественно оценить износ по изменению массы образцов, профилю поверхности и визуальному состоянию зоны воздействия;

– сформулировать рекомендации по выбору наиболее эффективных покрытий для сопловых аппаратов, эксплуатируемых в условиях повышенной запыленности [4].

Испытания планируется проводить на специализированной пескоструйной установке с использованием кварцевого песка фракции 0,1–0,3 мм при угле атаки струи 30°, что соответствует характеру касательного удара частиц в реальных условиях эксплуатации ГТУ. Перед обработкой образцы будут предварительно нагреваться до температуры 850 °C — значения, характерного для соплового аппарата современных газотурбинных установок. Оценка износа будет осуществляться комплексно: по изменению массы, визуальному состоянию зоны воздействия абразивной струи.

Применение износостойких покрытий является одним из наиболее перспективных и эффективных направлений повышения ресурса и надежности деталей, работающих в агрессивных газопылевых средах. Сравнительные испытания традиционного аллитированного покрытия и инновационного TiAlO-покрытия позволят обоснованно выбрать оптимальное защитное решение для ГТУ, эксплуатируемых в сложных климатических и промышленных условиях, включая пустынные, горные и промышленно загрязненные регионы. Экспериментальные результаты будут представлены после завершения цикла испытаний и всестороннего анализа полученных данных.

Список источников

[1] Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Повышение эрозионной и коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД с помощью нанослойного покрытия. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2013, № 4, с. 1–7.

[2] Смыслов А.М., Дыбленко Ю.М., Прокопчук К.А. Оценка влияния угла атаки и фракционной зернистости песка на эрозионную стойкость поверхности титановых сплавов с ионно-плазменными защитными покрытиями. *Вопросы науки и образования*, 2012, № 18(143), с. 4–10.

[3] Будиновский С.А., Ляпин А.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С., Татарников С.В. Нанесение многослойного антифреттингового покрытия на крупногабаритные изделия. *Авиационные материалы и технологии*, 2022, № 3(68), ст. 09.

[4] Александров Д.А., Доронин О.Н., Журавлева П.Л., Бенклян А.С. Исследование эрозионно-коррозионностойких покрытий для защиты титановых моноколес вертолетных газотурбинных двигателей. *Труды ВИАМ*, 2023, № 9(127), ст. 08. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100

Investigation of the effect of various coatings on the erosive wear of nozzle inserts

Krasnov Andrey Vitalievich andreykrasnow@icloud.com
Shevelev Denis Vladimirovich denis.v.shevelev@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The problem of erosive wear of the inserts of the nozzle apparatus of gas turbine installations caused by the tangential action of quartz dust at high temperatures is considered. A comprehensive approach to the assessment of dust resistance is presented, including the classification of dust types, an analysis of the disadvantages of traditional testing methods and justification of laboratory test parameters. For a comparative assessment of the effectiveness of protective solutions, three sample variants are planned to be tested — uncoated, alitized, and ceramic coated based on titanium and aluminum oxide (TiAlO) — in conditions simulating real-world operation. The results obtained will allow to increase the resource of GTU operated in desert and industrial regions.

Keywords: *dust resistance, nozzle unit, abrasive wear, protective coating, quartz dust, gas turbine unit, altering, TiAlO*

УДК 621.63

Исследование характеристик тракта стопорно-регулирующих клапанов паровой турбины средней мощности

Миронов Юрий Николаевич mironovyun@student.bmstu.ru
Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Произведен обзор и анализ литературных источников по стопорно-регулирующим клапанам паровых турбин. Смоделирован и исследован тракт паровпуска турбины К-27-1,3 с целью получения его характеристик и модернизации. Предложены мероприятия для улучшения характеристик тракта подвода пара и сформированы цели и задачи для дальнейших исследований, включающие в себя переход на комбинированную схему конструкции клапанов и оптимизацию течения в проточной части подвода пара турбины средней мощности.

Ключевые слова: *паровая турбина, паровпуск, стопорно-регулирующий клапан, паротурбинная установка, гидравлическая характеристика*

Системы паровпуска турбин, включающие в себя подводящие паропроводы, стопорные и регулирующие клапана, каналы подвода пара к ступеням турбины, во многом определяют эффективность регулирования режима работы турбины, скорости пуска/останова оборудования, экономичность и надежность всей турбоустановки.

Основными клапанами турбины являются: стопорный и регулирующий. Регулирующие клапана — устройства для регулирования пропуска и перенаправления потоков пара. Стопорный клапан — аварийный элемент, который осуществляет быстрое и гарантированное перекрытие доступа пара к проточной части турбины.

К стопорным и регулирующим клапанам предъявляются общие требования:

– обеспечение необходимой плотности в закрытом положении;

– по возможности меньшее сопротивление и тем самым меньшие потери энергии при прохождении пара через полностью открытый клапан;

– приемлемая величина усилия, требуемого для перемещения клапана как при регулировании, так и в момент открытия;

– стабильный характер течения пара в клапане при всех режимах;

– высокая надежность в работе;

– простота конструкции;

– ремонтопригодность.

Конструкции клапанов разнообразны [1–4]. В основе их классификации лежат форма запорного органа, направление движения пара, число седел, значение силы, действующей на шток при открытии клапана, направление усилия, приложенного к штоку в момент открытия, и система привода.

По форме запорного органа регулирующие клапаны подразделяются на тарельчатые, шаровые, профилированные, поршневые и колокольные [1, 2] (рис. 1).

По направлению движения пара регулирующие клапаны разделяют на угловые и прямоточные (рис. 2) [2].

По значению силы, необходимой для открытия клапанов, клапаны делятся на неразгруженные и разгруженные. Варианты разгруженных клапанов изображены на рис. 3.

По направлению действия сил на шток клапаны разделяются на конструкции с тянущим и толкающим штоками.

По системе привода выделяют клапаны с индивидуальным приводом, когда каждый клапан снабжен своей собственной системой перемещения и клапаны с траверсным регулированием.

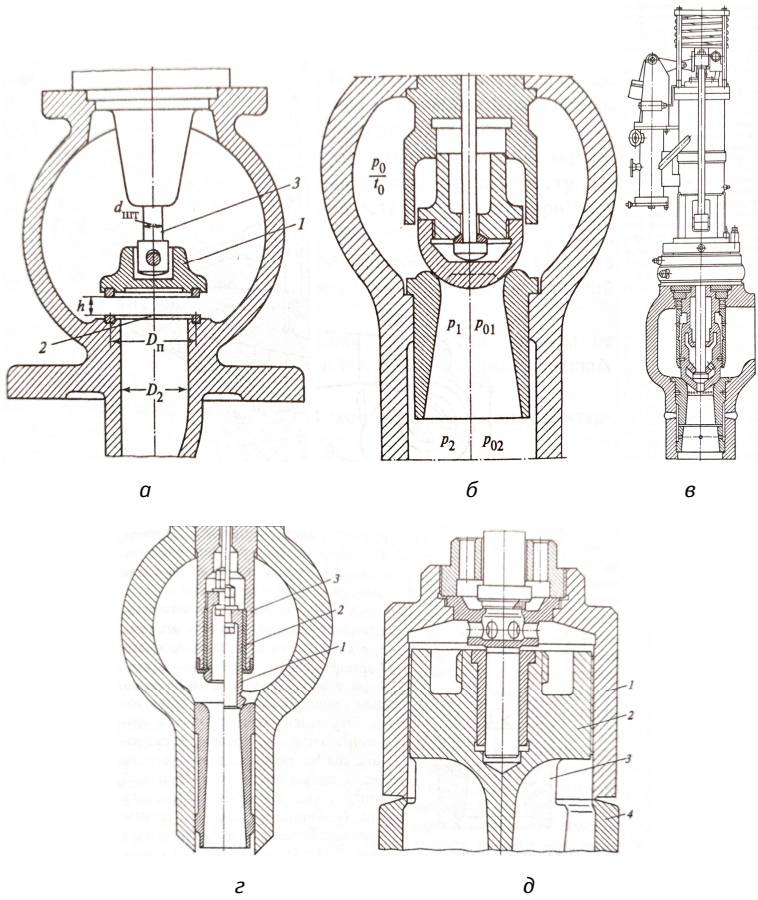


Рис. 1. Регулирующие клапаны:
а — тарельчатый клапан; *б* — шаровой регулирующий клапан; *в* — клапан с профилированным запорным органом; *г* — поршневой регулирующий клапан; *д* — колокольный клапан

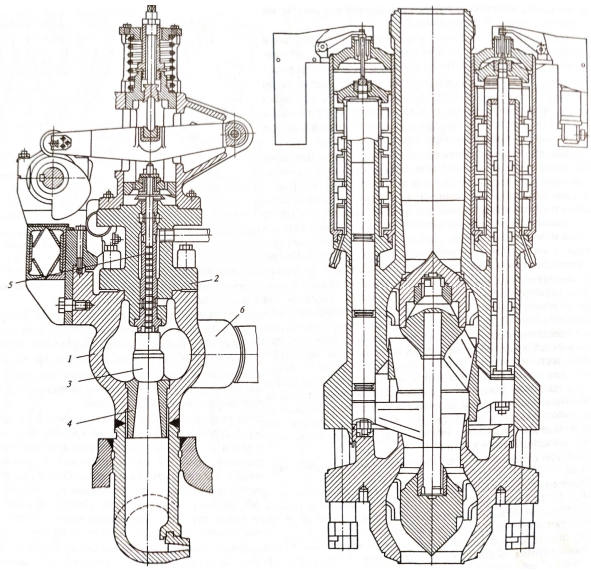


Рис. 2. Различные по направлению движения пара регулирующие клапаны:
а — угловой; *б* — прямоточный

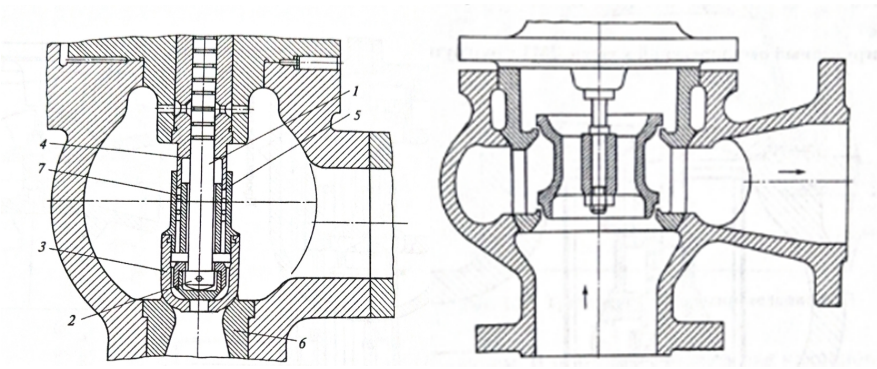


Рис. 3. Разгруженные регулирующие клапана

Эксплуатационные качества регулирующих клапанов оцениваются по расходным, силовым и виброакустическим характеристикам. Для их получения обычно используют данные лабораторных испытаний на моделях или компьютерное моделирование.

Стопорные клапаны являются важными элементами паровых турбин, обеспечивающими защиту оборудования от избыточного давления пара и предотвращения аварии (рис. 4) [2]. Классификация стопорных клапанов осуществляется по нескольким признакам:

– по принципу действия они делятся на автоматические и управляемые;

– по конструкции: прямого действия (клапан открывается непосредственно давлением пара) и непрямого действия (используется вспомогательная система управления, такая как электропневматический привод);

– по типу привода: механические, гидравлические и электроприводные.

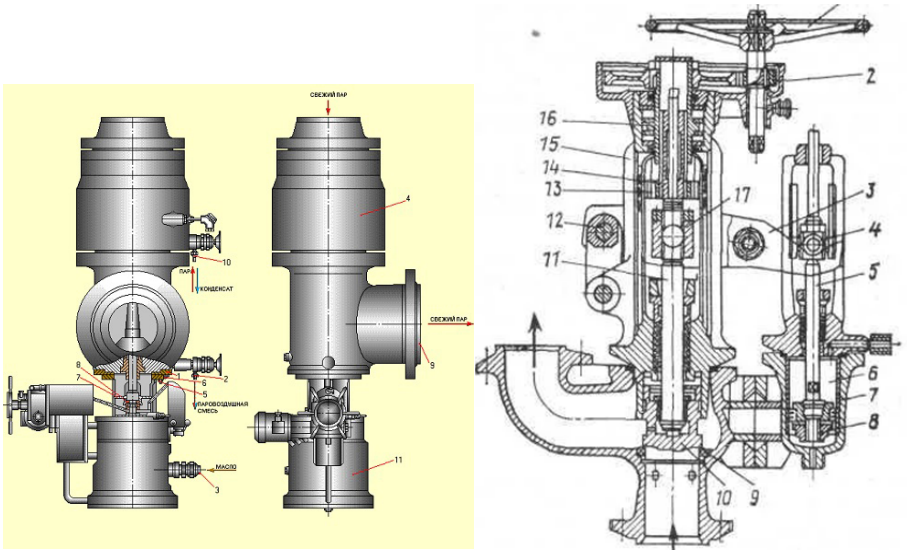


Рис. 4. Стопорные клапана паровых турбин

Улучшения характеристик тракта стопорно-регулирующих клапанов паровой турбины направлены на снижение гидравлического сопротивления подвода пара при полном открытии клапанов, уменьшение статических и динамических усилий на штоках, а также за счет рациональной компоновки пароподводящего узла. Эти мероприятия могут быть реализованы за счет принятия некоторых конструктивных решений, например совмещение стопорного и регулирующего клапанов в одном корпусе, сокращение и выравнивание подводящих паропроводов, переход с вертикальной на горизонтальную компоновку пароподвода и т. п. Использование современных методов расчета и моделирования течений в клапанных системах позволяет проводить эффективную оптимизацию [3, 4] тракта стопорно-регулирующих клапанов на базе анализа имеющихся многочисленных их конструкций.

В качестве исследуемого объекта взят тракт подвода пара турбины К-27-1,3 (ПАО «КТЗ»), состоящий из стопорного и дроссельного регулирующего клапанов, а также паропровода между ними. Построена и исследована его 3D-модель, представленная на рис. 5.

Моделирование показало, что имеющаяся конструкция имеет паропровод сложной конфигурации с большим количеством поворотов и раздельными

клапанами, что объясняет его повышенное гидравлическое сопротивление даже при полном открытии клапанов.

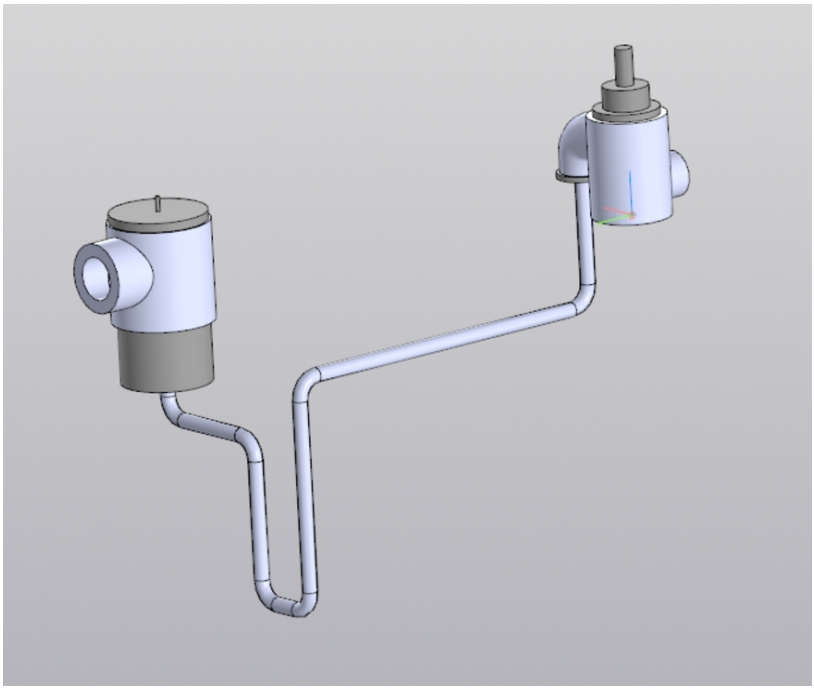


Рис. 5. Модель тракта стопорно-регулирующих клапанов

Для улучшения характеристик тракта предложены следующие варианты конструктивных изменений:

– применение комбинированных стопорно-регулирующих клапанов (СРК), объединяющих в едином корпусе стопорный клапан (СК) и регулирующий клапан (РК). Это позволит снизить общее гидравлическое сопротивление, уменьшит металлопмкость конструкции и упростит компоновку;

– уменьшение длины и упрощение формы проходного канала паропровода, соединяющего стопорный и регулирующий клапан, для уменьшения местных потерь и потерь по длине тракта;

– увеличение площади проходных сечений паропроводов и каналов клапанов для уменьшения скоростей рабочего тела с целью минимизации потерь;

– использование профилированных запорных органов, которые обеспечивают при большинстве режимов работы турбины безотрывное течение пара.

Таким образом, предложены мероприятия для улучшения характеристик тракта стопорно-регулирующих клапанов и сформированы цели и задачи для

дальнейших исследований, включающие в себя переход на комбинированную схему конструкции клапанов и оптимизацию течения в проточной части подвода пара турбины средней мощности.

Список источников

[1] Кирюхин В.И., Тараненко Н.М., Огурцова Е.П. *Паровые турбины малой мощности КТЗ / П 18.* Москва, Энергоатомиздат, 1987, 216 с.

[2] Зарянкин А.Е., Симонов Б.П. *Регулирующие и стопорно-регулирующие клапаны.* Москва, Изд-во МЭИ, 2005, 360 с.

[3] Жинов А.А. *Совершенствование регулирующих клапанов паровых турбин в трансзвуковой области течения.* Автореф. дис. … канд. техн. наук. Москва, 1994, 19 с.

[4] Готовцев А.М. *Разработка и исследование систем стабилизации течения пара в выхлопных патрубках и выносных регулирующих клапанах паровых турбин.* Дис. … канд. техн. наук. Москва, 2006, 207 с.

Study of the characteristics of the shutoff and control valves of a medium-power steam turbine

Mironov Yuri Nikolaevich mironovyun@student.bmstu.ru

Zhinov Andrey Alexandrovich azhinov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A review and analysis of literature on shutoff and control valves in steam turbines was conducted. The steam inlet duct of the K-27-1.3 turbine was modeled and analyzed to determine its characteristics and upgrade them. Measures were proposed to improve the performance of the steam inlet duct, and goals and objectives for further research were formulated, including the transition to a combined valve design and flow optimization in the steam inlet duct of a medium-power turbine.

Keywords: *steam turbine, steam inlet, shutoff and control valve, steam turbine unit, hydraulic characteristics*

УДК 621.438:621.928.9

Совершенствование системы очистки воздуха транспортного газотурбинного двигателя

Гожин Владислав Александрович gva25kma002@student.bmstu.ru
Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Разработан усовершенствованный вариант завихрителя и конуса циклона воздухоочистки для газотурбинного двигателя методами численного моделирования и натурных испытаний. Сравнение полученных результатов показало значительное снижение разрежения на входе в двигатель, а следовательно снижение гидравлического сопротивления разработанных моделей. Принято решение о проведении дальнейших испытаний экспериментальных образцов с целью определения разницы в коэффициентах пропуска пыли. Полученные результаты могут быть полезны для увеличения мощности двигателя и уменьшения потерь от гидравлического сопротивления системы очистки воздуха.

Ключевые слова: *циклон, воздухоочистка, гидравлическое сопротивление, пылеуловитель, газотурбинный двигатель*

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации [1]. При небольших капитальных затратах и эксплуатационных расходах циклоны обеспечивают очистку газов эффективностью 80–95 % от частиц пыли размером более 10 мкм. Циклонные пылеуловители являются надежными устройствами очистки, т. к. в их конструкции нет сложного механического оборудования, а сепарация пылевых частиц осуществляется под воздействием центробежной силы [2]. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое применение, в том числе в транспортных газотурбинных двигателях (ГТД).

Несмотря на многообразие новых и усовершенствованных конструкций сухих пылеуловителей, цели их совершенствования: повысить эффективность улавливания пыли, особенно наиболее трудноуловимой — мелкодисперсной, снизив при этом гидравлическое сопротивление аппарата, то есть провести высокоэффективный процесс сепарации пыли при наименьших энергетических и материальных потерях [3].

Конструкцию циклона определяют с учетом характеристик загрязнений, требуемой эффективности, производительности системы и условий эксплуатации. Учитывают размер частиц пыли, плотность, абразивность, концентрацию запыленности и другие параметры. Оптимальные конструктивные параметры в основном определяют экспериментально [4].

Путем модернизации конструкции циклона можно снизить его гидравлическое сопротивление, что приведет к увеличению полезной мощности ГТД

[2]. Коэффициент гидравлического сопротивления для каждого типа циклонного аппарата обычно устанавливается опытным путем на чистом (незапыленном) газе. Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов разных типов существенно отличаются, возрастая вместе с эффективностью пылеулавливания [5].

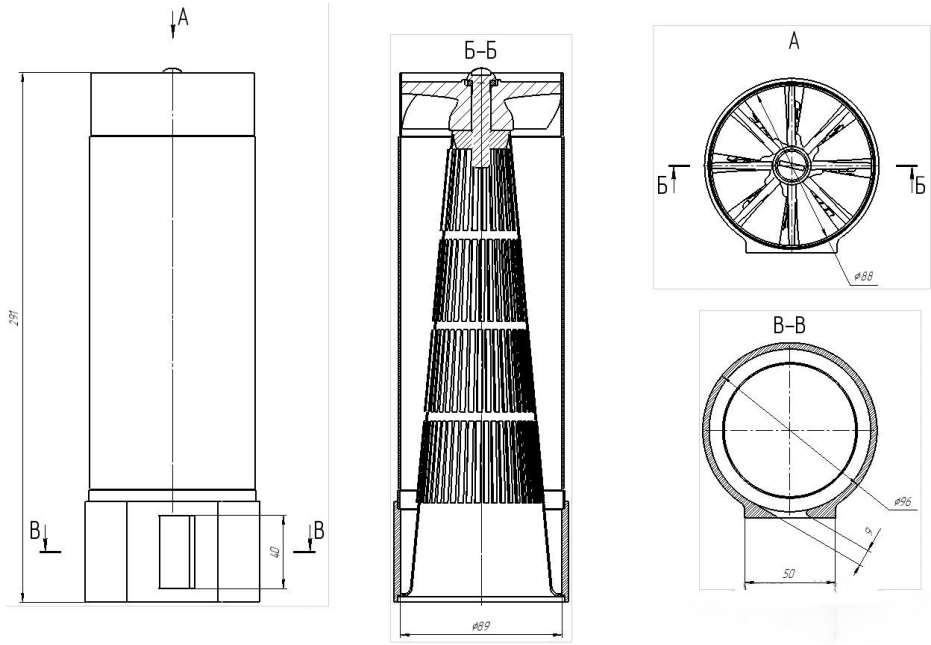


Рис. 1. Компоновочный чертеж серийного циклона

При проектировании современных систем воздухоочистки все чаще пользуются системами 3D-моделирования и численными методами, заложенными в специализированное ПО, но в связи со сложностью нестационарного течения потока в реальных изделиях возникает проблема оценки достаточности степени детализации глобальной и локальных расчетных сеток, принятых в расчетной модели, а также оценки адекватности получаемых результатов численного эксперимента. Оценить это позволяют натурные испытания реальных моделей на продувочных стендах.

В данной работе разработана 3D-модель натурного циклона с серийными завихрителем и конусом (рис. 1), 3D-модель экспериментального циклона с усовершенствованными завихрителем и конусом, а также проведены численные и натурные эксперименты по продувке каждого из вариантов.

В качестве граничных условий были выбраны параметры потока, обуславливающие расход на выходе из циклона. Для воздушного потока на входе было принято атмосферное давление $P_в$ = 101,325 кПа и температура $t_в$ =

288 К (15 °С). Массовые расходы чистого воздуха на входе в компрессор ГТД, на входе в трассу отбора и расход запыленного воздуха на трассу отсоса составляли $G_{мот.}$ = 0,1493 кг/с, $G_{отб.}$ = 0,0157 кг/с и $G_{отс.}$ = 0,0196 кг/с соответственно.

Численный эксперимент проводился при различном уровне дробления расчетной сетки. Было выявлено, что дробление сетки более, чем на 900 тысяч ячеек в области течения, не дает существенного изменения результатов моделирования.

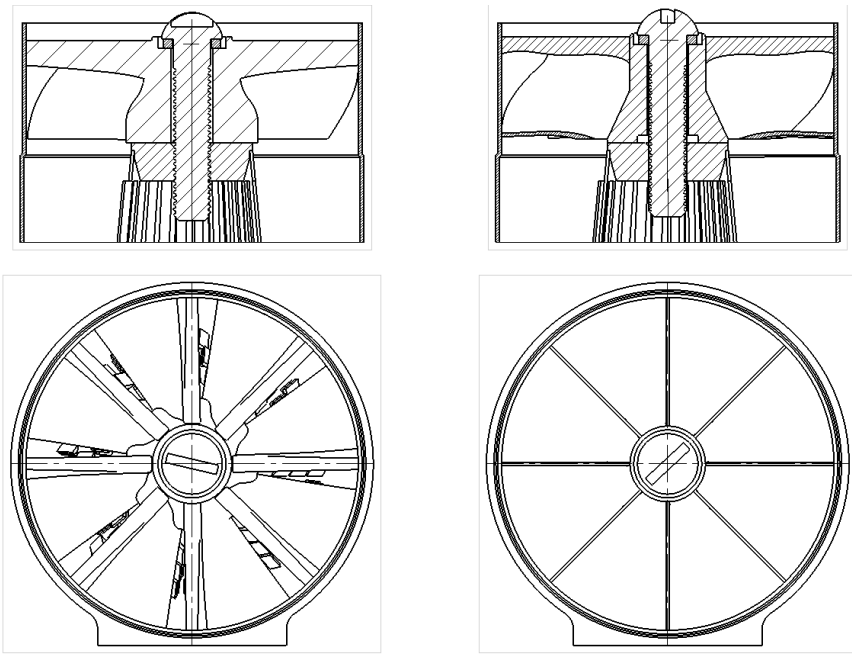


Рис. 2. Серийный завихритель (слева) и новый завихритель с усовершенствованными втулкой и лопатками (справа)

В данной работе вместо штатного литого завихрителя были разработаны модели втулки и штампованных лопаток завихрителя (рис. 2), что увеличило площадь проходного сечения в 1,11 раза. Цилиндро-коническая втулка, плавно перетекающая в конус циклона, позволяет уменьшить зону обратных течений, что повышает эффективность пылеуловителя.

Также был разработан новый конус с расширенными отверстиями для прохода воздуха, что увеличило площадь проходного сечения в 1,22 раза. Такое решение повысило пропускную способность, а, следовательно, уменьшило гидравлическое сопротивление изделия.

Было проведено численное моделирование течения воздуха в разработанных моделях, которое показало их эффективность.

В ходе натурных испытаний экспериментальных образцов на специализированном продувочном стенде был получен аналогичный численному моделированию результат, из которого видно, что потери давления в усовершенствованном циклоне ниже прототипа примерно на 50 мм вод. ст.

Таким образом, данные испытания совместно с проведением численного эксперимента позволяют рекомендовать подобные конструктивные решения для увеличения пропускной способности циклона воздухоочистки транспортного ГТД, а также для дальнейших испытаний на определение коэффициента пропуска пыли.

Список источников

[1] Пирумов А.И. *Обеспыливание воздуха.* Москва, Стройиздат, 1974, 207 с.

[2] Иванков Д.И., Гритчин Р.Д., Тюрин А.Н. Анализ работы циклонов для пылеулавливания. *Молодой ученый*, 2016, № 13(117), с. 165–168.

[3] Каплунов Д.Р., Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В. Анализ конструкций пылеуловителей циклонного типа для мелкодисперсной пыли. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*, 2018, № 2, с. 49–71.

[4] Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. *Технология пылеулавливания.* Ленинград, Машиностроение, 1985, 192 с.

[5] Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Петров О.А. Экспериментальные и численные исследования гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40. *Труды БГТУ*, 2016, № 3, с. 154–160.

Improving the air cleaning system of a transport gas turbine engine

Gozhin Vladislav Alexandrovich gva25kma002@student.bmstu.ru
Zhinov Andrey Alexandrovich azhinov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

An improved design of a swirler and cyclone cone for an air cleaning system for a gas turbine engine was developed using numerical modeling and field testing. A comparison of the obtained results revealed a significant reduction in engine inlet vacuum, and consequently, a reduction in the hydraulic resistance of the developed models. A decision was made to conduct further testing of experimental prototypes to determine the difference in dust permeability. The obtained results may be useful for increasing engine power and reducing losses due to hydraulic resistance in the air cleaning system.

Keywords: *cyclone, air cleaning, hydraulic resistance, dust collector, gas turbine engine*

Секция 5. Методы теории автоматического управления; автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

УДК 004.032.26

Детекция речевой активности с использованием LSTM-сетей

Качанов Александр Ильич kachanovai@student.bmstu.ru
Корлякова Мария Олеговна mkorlyakova@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача детекции речевой активности (Speech Activity Detection, SAD), которая заключается в определении наличия или отсутствия речи в заданном фрагменте аудиосигнала. Данная задача является ключевым этапом в системах автоматического распознавания речи, диаризации говорящих, системах безопасности и других приложениях, где требуется предварительная фильтрация речевых и неречевых сегментов. Рассмотрена реализация модели детекции речи на основе рекуррентных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM), способных эффективно учитывать временные зависимости в последовательностях аудиопризнаков.

Ключевые слова: *детекция речевой активности, LSTM, мел-кепстральные коэффициенты, спектральный анализ, PyTorch*

Актуальность задачи детекции речевой активности (SAD) обусловлена ее ключевой ролью в современных системах обработки речи. С ростом распространения голосовых интерфейсов, систем автоматического распознавания и анализа аудиоконтента возрастает потребность в надежных методах предварительной фильтрации речевых сегментов, особенно в условиях реального времени и нестационарного акустического фона. Эффективная SAD-система позволяет значительно повысить точность последующих этапов обработки и снизить вычислительные затраты, что делает ее разработку востребованной как в научном, так и в прикладном плане [1].

Целью работы является разработка и экспериментальная реализация нейросетевой модели, способной с высокой точностью классифицировать фрагменты аудиосигнала. Для достижения цели были решены следующие задачи: сбор и разметка аудиоданных, предобработка и унификация формата записей, спектральный анализ сигналов, извлечение признаков на основе мел-кепстральных коэффициентов (MFCC) и обучение LSTM-модели для детекции речи.

Для решения задачи была выбрана архитектура на основе LSTM-сетей. Такие сети особенно эффективны при обработке последовательных данных, поскольку способны сохранять информацию о предыдущих состояниях и моделировать долгосрочные зависимости — критически важное свойство для анализа временных рядов.

В качестве входных признаков использовались мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) [2] — компактное и информативное описание спектральной формы звукового сигнала, учитывающее особенности человеческого восприятия. Извлечение MFCC включает следующие этапы: разбиение сиг-

нала на короткие фреймы (20–40 мс), применение оконной функции, быстрое преобразование Фурье (FFT), проекция спектра мощности на шкалу Мел с помощью треугольных фильтров, логарифмирование энергий и дискретное косинус-преобразование (DCT).

Разметка исходных записей проводилась в программе Label Studio. Каждому временному интервалу с речью присваивалась метка, а также выполнялась транскрипция. В результате была сформирована разметка на уровне фреймов: 1 — присутствие речи, 0 — отсутствие. Пример размеченного аудиофайла представлен на рис. 1.

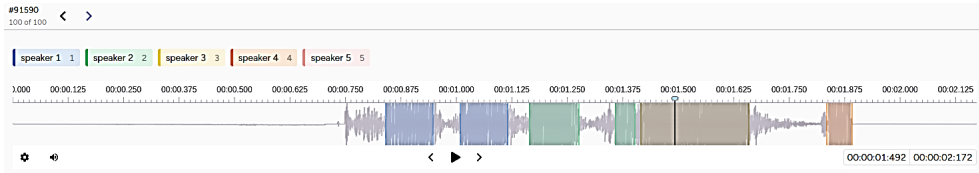


Рис. 1. Пример разметки одного аудиофайла в Label Studio

Исходные звуковые файлы имели различную продолжительность и качество. После экспорта разметки из Label Studio были выявлены ошибки: отсутствие временных меток, некорректные пути к файлам, пропущенные транскрипции. Для устранения этих проблем был реализован конвейер предобработки:

– фильтрация записей, содержащих только шум или не имеющих разметки;

– декодирование путей к звуковым файлам, которые в Label Studio хранятся в закодированном виде;

– объединение коротких речевых фрагментов в 30-секундные записи с паузами по 0,5 секунды между ними для унификации длины входных данных;

– формирование CSV-файла с путями к новым файлам, транскрипциями и списком временных интервалов с речью.

Такой подход позволил создать однородный и структурированный датасет, пригодный для обучения нейросетевой модели. Пример данных для обучения модели представлен на рис. 2.

	wav	transcriptions	timings
1	audio_0.wav	путайска нормально да разъезжаетесь? второй номер машинисту второй помечаю	, 21.984], [22.484, 23.747], [23.747, 26.129], [26.629, 27.939]]
2	audio_1.wav	вятнадцать тридцать три по готовности пробуем тормоза пятьдесят второй путь -1	9, 17.068], [17.568, 18.458], [18.458, 23.382], [23.882, 27.74]]
3	audio_2.wav	, Дим, я тебя слышу, как меня? машинист Порошков Слушаю, слушаю Слушаю вас	, 14.485], [14.985, 16.194], [16.694, 18.116], [18.616, 20.607]]
4	audio_3.wav	енадцатому. Дима, по четыреста двенадцатому Чо там, в процессе? Да в процессе	).202, 22.686], [23.186, 25.39], [25.89, 27.85], [28.35, 29.429]]
5	audio_4.wav	э-да, спасибо Там есть глухое окно, поэтому без проблем переедешь Бригадин 158	4, 20.275], [20.775, 22.292], [22.292, 26.132], [26.132, 27.86]]

Рис. 2. Пример структуры данных модели

Для визуального и аналитического контроля качества данных был проведен спектральный анализ каждого звукового файла. Анализ включал три представления:

– временной сигнал — график амплитуды от времени. Позволил подтвердить наличие выраженных речевых пиков и корректность вставки пауз. Пример временного сигнала представлен на рис. 3;

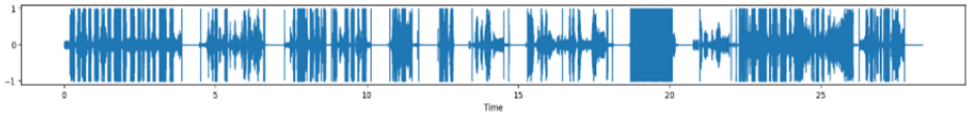


Рис. 3. Пример временного сигнала

– амплитудный спектр — результат применения FFT. Показал, что основная энергия сосредоточена в диапазоне до 800 Гц, что соответствует характеристикам человеческой речи. Пример спектра сигнала представлен на рис. 4;

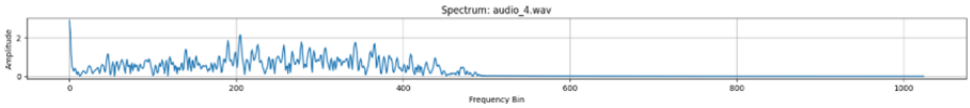


Рис. 4. Пример спектра сигнала

– спектрограмма — визуализация частотного состава сигнала во времени. На спектрограммах четко различимы форманты и временные границы речевых сегментов. Пример спектрограммы сигнала представлен на рис. 5.

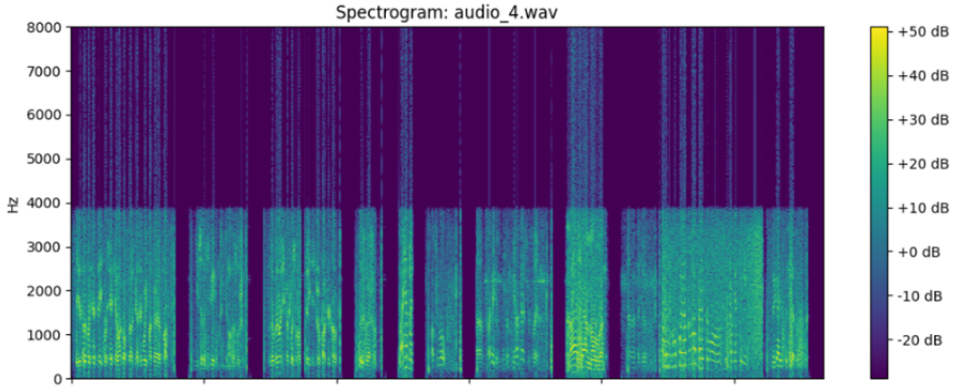


Рис. 5. Пример спектрограммы сигнала

Результаты анализа показали, что уровень фонового шума в большинстве записей незначителен и не мешает выделению речевых признаков.

Для решения задачи детекции речевой активности (Speech Activity Detection, SAD) была разработана рекуррентная нейронная сеть на базе Long Short-Term Memory (LSTM) [3], реализованная в фреймворке PyTorch. Архитектура модели включает:

– два слоя LSTM с размерностью скрытого состояния 128. Каждый слой принимает на вход последовательность векторов признаков (MFCC) и передает информацию о контексте следующему слою;

– полносвязный классификатор, состоящий из промежуточного слоя с 64 нейронами и выходного слоя с одним нейроном. Выходной слой не имеет активационной функции, так как используется функция потерь BCEWithLogitsLoss, которая объединяет сигмоиду и бинарную кросс-энтропию в одну стабильную операцию;

– для предотвращения переобучения в модели применен механизм Dropout с вероятностью 0,5 после каждого LSTM-слоя и после промежуточного полносвязного слоя.

В качестве входных признаков использовались последовательности MFCC-коэффициентов длиной 13, извлеченные из аудиофайлов с частотой дискретизации 16 кГц и шагом окна 160 отсчетов (что соответствует ~10 мс на фрейм). Для каждого фрейма задавалась бинарная метка: 0 — тишина/шум, 1 — речь.

Исходный набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки. Разделение выполнялось по файлам: все файлы, кроме двух последних, вошли в обучающую выборку, а два последних — в тестовую. Таким образом, модель оценивалась на полностью независимых данных, которые не участвовали в обучении.

Для обработки последовательностей разной длины был реализован пользовательский класс SpeechDataset и функция collate fn, передаваемая в DataLoader. Эта функция автоматически дополняет более короткие последовательности нулями до длины самой длинной последовательности в текущем батче, что позволяет эффективно использовать векторизованные операции PyTorch [4].

Модель обучалась в течение 10 эпох с размером батча 8. В качестве функции потерь использовалась BCEWithLogitsLoss, а оптимизатор — AdamW с начальной скоростью обучения (learning rate) 0.001. На каждой эпохе вычислялись следующие метрики качества на обучающей выборке: accuracy, precision, recall, f1-score, roc-auc.

Лучшая модель сохранялась в виде чекпоинта при достижении максимального значения AUC-ROC на обучающей выборке. Отдельная валидационная выборка для подбора гиперпараметров не использовалась; вместо этого финальная оценка производилась на заранее выделенной тестовой выборке. Пример предсказаний модели на тестовых данных представлен на рис. 6, где синей линией показаны вероятности речи, выдаваемые моделью; оранжевой — истинные метки (1 — речь, 0 — тишина). Хорошее совпадение кривых свидетельствует о высокой точности детекции границ речевых сегментов.

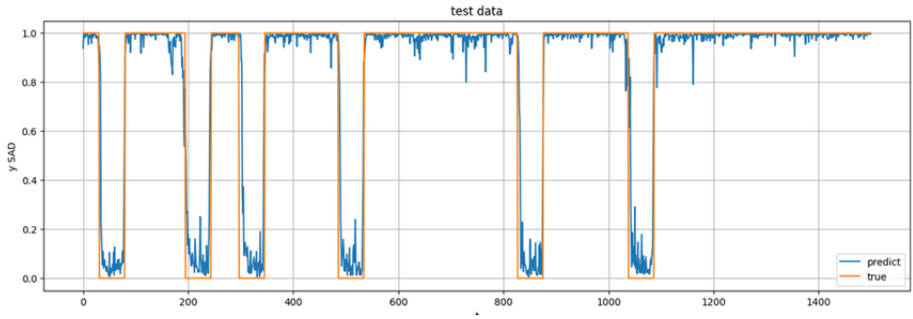


Рис. 6. Пример предсказаний модели на тестовых данных

Уже на второй эпохе значение AUC-ROC на обучающей выборке превысило 0,97, а к завершению обучения (10-я эпоха) достигло 0,9891. Наблюдался устойчивый рост всех метрик, что свидетельствует о стабильной сходимости процесса обучения. Пример изменения метрик и потерь модели представлен на рис. 7, где изменение потерь (синяя пунктирная линия), AUC-ROC (зеленая сплошная) и F1-score (черная пунктирная) на обучающей выборке по эпохам. Красная, фиолетовая и желтая точки — значения этих метрик на тестовой выборке, демонстрирующие хорошую обобщающую способность модели.

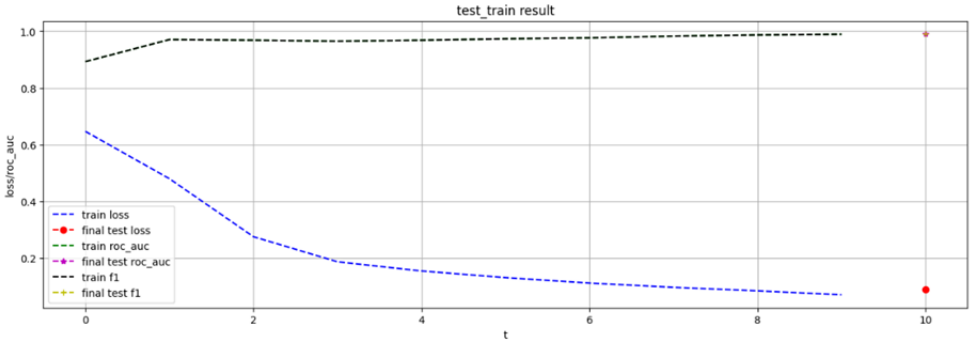


Рис. 7. Динамика метрик обучения

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность LSTM-архитектур для задачи детекции речевой активности на уровне фреймов. Модель продемонстрировала отличную обобщающую способность и высокие значения всех ключевых метрик на независимой тестовой выборке. Представленный подход может служить надежной основой для дальнейших исследований и практических применений в системах обработки речи.

Список источников

[1] Кравцов С.А., Топников А.И. Исследование работы детектора речевой активности в задаче идентификации диктора. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*, 2015, № 4, с. 61–64.

[2] *Кепстр и мел-частотные кепстральные коэффициенты.* URL: https://fpga-systems.space/dsp/hukenovs/dsp_theory_14_mfcc/ (дата обращения 10.02.2025).

[3] Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. *Искусственные нейронные сети и их приложения.* Казань, Изд-во Казанского университета, 2018, с. 74–91.

[4] *PyTorch Documentation.* URL: https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.LSTM.html (дата обращения 10.02.2025).

Speech activity detection using LSTM networks

Kachanov Alexander Ilyich kachanovai@student.bmstu.ru
Korlyakova Maria Olegovna mkorlyakova@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper addresses the task of Speech Activity Detection (SAD), which involves determining the presence or absence of speech in a given segment of an audio signal. This task is a crucial step in automatic speech recognition systems, speaker diarization, security systems, and other applications requiring preliminary separation of speech and non-speech segments. The study presents an implementation of a speech detection model based on Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural networks, which effectively capture temporal dependencies in sequences of audio features.

Keywords: *speech activity detection, LSTM, Mel-frequency cepstral coefficients, spectral analysis, PyTorch*

УДК 004.032.26

Применение метода Байеса для автоматизированной идентификации надводных объектов

Поляков Вадим Николаевич pvn23ki195@student.bmstu.ru
Николаев Павел Викторович pnv11987@mail.ru
Корлякова Мария Олеговна mkorlyakova@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача автоматизированной идентификации надводных объектов по совокупности радиолокационных признаков в условиях частичной или неточной информации. Представлен модифицированный наивный байесовский классификатор, учитывающий уникальность источников излучения и допускающий отсутствие данных о длине корпуса. Показано, что предложенный подход обеспечивает высокую дискриминативную способность для классов с уникальными признаками и устойчив к пропускам числовых данных. Сделан вывод, что разработанная модель может быть эффективно применена в системах морского мониторинга и пассивной радиолокации.

Ключевые слова: *машинное обучение, классификация, метод Байеса, автоматизированная идентификация*

Современные системы морского наблюдения требуют быстрой и надежной идентификации надводных объектов. Традиционные методы, основанные на экспертном анализе радиолокационных данных, трудоемки и подвержены субъективным ошибкам. Целью работы является разработка модели автоматизированной классификации надводных судов, способную с высокой достоверностью определять тип объекта по списку обнаруженных источников излучения и условной длине корпуса.

Задача заключается в отнесении каждого наблюдаемого надводного объекта к одному из заранее заданных классов на основе двух видов признаков:

– категориальные признаки — перечень обнаруженных источников излучения (ИИ);

– числовой признак — условная длина корпуса (может отсутствовать).

Для решения задачи был выбран наивный байесовский классификатор — один из самых простых, но при этом эффективных алгоритмов вероятностной классификации. Он основан на теореме Байеса и предположении об условной независимости признаков относительно класса [1]. Даже при нарушении предположения об условной независимости признаков, наивный байесовский классификатор часто сохраняет высокую точность благодаря компенсации ошибок в оценке вероятностей [2].

Теорема Байеса позволяет рассчитать апостериорную вероятность. Формула теоремы Байеса выглядит следующим образом:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)},$$

где $P(A|B)$ — апостериорная вероятность события A при условии B (при наличии события B, то есть для новых входных признаков); $P(B|A)$ — априорная вероятность события B при условии A; $P(A)$ — априорная вероятность события A; $P(B)$ — априорная вероятность события B.

В контексте нашей задачи классификации надводных объектов:

$$P(\text{класс}|\text{ИИ}, \text{Размер}) = \frac{P(\text{ИИ},\text{Размер}|\text{класс})P(\text{класс})}{P(\text{ИИ},\text{Размер})}.$$

В классическом подходе априорная вероятность $P(A)$ определяется как доля объектов данного класса в обучающей выборке. Однако для предотвращения доминирования частых классов и игнорирования редких используется логарифмический вес:

$$P(\text{класс}) \approx \log(\text{class_count}[\text{cls}] + 1),$$

где class_count[cls] — это количество станций в классе. Это предотвращает ситуацию, когда редкие классы полностью игнорируются.

Такой подход согласуется с современными трактовками байесовского оценивания, где априорные распределения используются не только для учета статистической частоты, но и для регуляризации модели в условиях несбалансированных данных.

Для категориального признака классический подход в нашей задаче будет иметь вид:

$$P(\text{ИИ}|\text{класс}) = \frac{\text{Количество раз,когда } A \text{ встречается в классе}}{\text{Общее количество ИИ в классе}}.$$

В предложенном решении эта вероятность корректируется с учетом уникальности источника излучения, чем реже ИИ встречается в других классах, тем она важнее.

$$\text{P}(\text{ИИ}|\text{класс}) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\text{arls_uniqueness}[\text{ИИ}_i]},$$

где arls_uniqueness[ИИ] — это «уникальность» ИИ. Она показывает на скольких разных классах кораблей встречается данный ИИ.

$$\text{arls}_{\text{uniqueness}[\text{ИИ}]} = \sum_{cls \in \text{классы}} I(\text{ИИ} \in \text{станции класса cls}),$$

где I (условие) — индикаторная функция (1, если верно, иначе 0) — все ИИ, которые встречаются у корабля этого класса.

Если ИИ встречается только в одном классе, он получает максимальный вес; если встречается в нескольких классах — его вес уменьшается. Такой подход повышает дискриминативную способность признаков, особенно в условиях пересечения радиотехнических характеристик различных типов судов [3].

Числовой признак (условная длина корпуса) задается опционально и обрабатывается без предположений о распределении. Вместо этого используется штрафная функция:

$$size = \frac{|class_size[cls] - input_size|}{200},$$

где class_size — эталонная длина класса из базы; input_size — входная длина корабля. Затем правдоподобие корректируется:

$$P(\text{Размер}|\text{класс}) \approx 1 - size.$$

Такой непараметрический подход к обработке числовых признаков согласуется с рекомендациями по построению гибридных байесовских моделей, где отказ от жестких предположений о виде распределения повышает робастность классификатора в условиях нестационарных данных [4].

В классическом НБК при независимых признаках итоговая оценка формируется как произведение вероятностей. В данной работе используется взвешенная сумма логарифмов: такое решение позволяет явно задать приоритетность ИИ и сохранить работоспособность при отсутствии данных о размере:

$$P(\text{ИИ}, \text{Размер}|\text{класс}) = 0{,}7 \times P(\text{ИИ}|\text{класс}) + 0{,}3 \times P(\text{Размер}|\text{класс}).$$

Такой подход обеспечивает устойчивость к отсутствию числового признака и позволяет явно задать значимость разных типов данных.

После вычисления всех вероятностей подставляем все в основную формулу:

$$P(\text{класс}|\text{ИИ}, \text{Размер}) = \frac{P(\text{ИИ,Размер}|\text{класс})P(\text{класс})}{P(\text{ИИ,Размер})}.$$

Далее выполняется нормализация в вероятностное распределение:

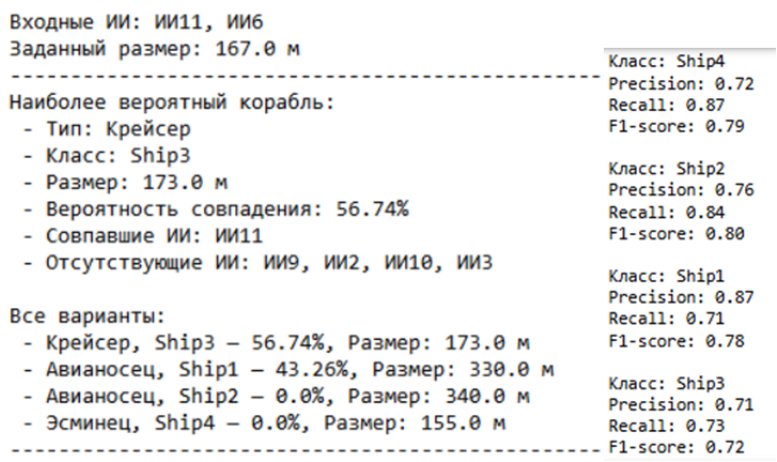
$$P(\text{класс}_i|\text{ИИ}, \text{Размер}) = \frac{P(\text{класс}|\text{ИИ,Размер})}{\sum_{i=1}^{n} \text{P(класс}|\text{ИИ,Размер})_i} \times 100\ \%.$$

Реализация и тестирование системы классификации. Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотек pandas и scikit-learn. В качестве обучающей базы использован эталонный набор, содержащий четыре класса надводных объектов. Для каждого класса заданы условная длина корпуса и набор характерных источников излучения. Эта база служит основой для вычисления весов признаков и построения вероятностной модели классификации.

Тестирование проводилось на синтетической выборке из 300 записей, каждая из которых содержала тип корабля, список ИИ и, при наличии, длину корпуса. Тестовые примеры сформированы путем случайного отбора одного из классов с последующим моделированием неполной радиолокационной картины: из полного набора ИИ выбранного класса отбирается от одного до четырех признаков, а размер либо задается с добавлением шума (10–20 м)

к эталонному значению, либо пропускается (примерно в 30 % случаев). Такой подход позволяет имитировать реальные условия наблюдения и оценить устойчивость модели к частичной или неточной информации.

Пример результатов работы алгоритма и соответствующие метрики качества классификации представлены на рисунке.



Результат работы алгоритма и метрики качества классификации

Оценка эффективности модели проведена по метрикам точности (precision), полноты (recall) и F1-score для каждого из четырех классов кораблей. Наиболее высокие показатели F1-меры продемонстрировали классы Ship2 и Ship4, что связано с наличием у них ряда уникальных или слабо пересекающихся источников излучения, а также четко выраженным размером.

Класс Ship1 характеризуется высокой точностью, но умеренной полнотой: модель редко ошибается при его распознавании, однако часть объектов этого типа остается нераспознанной из-за сильного пересечения ИИ с другими классами. У Ship3 наблюдается баланс между precision и recall, но оба значения ниже, чем у остальных классов, что объясняется значительным дублированием его ИИ с ИИ других классов.

Таким образом, основным фактором, влияющим на качество распознавания, является степень уникальности набора источников излучения. Модель устойчива к частичной информации и пропускам данных о размере, однако ее эффективность снижается при значительном пересечении признаков по классам.

Представленный модифицированный наивный байесовский классификатор обеспечивает высокую достоверность идентификации надводных объектов в условиях неполных или зашумленных данных, характерных для реальных сценариев морского мониторинга. Подход, основанный на учете уникальности источников излучения и адаптивном взвешивании признаков,

позволяет повысить дискриминативную способность модели даже при наличии значительного пересечения радиотехнических характеристик различных судов.

Список источников

[1] Ветров Д.П., Кропотов Д.А. *Байесовские методы машинного обучения.* Москва, Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007, с. 15–28.

[2] Шумский С.А. *Байесовские методы в задачах распознавания образов.* Москва, МИФИ, 2002, с. 8–14.

[3] Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Мальцев О.Г. Адаптация и обучение распознающей системы при байесовской классификации излучающих целей. *Морской вестник*, 2022, № 1(81), с. 87–91.

[4] Ветров Д.П., Кропотов Д.А. *Байесовские методы машинного обучения. Часть 2.* Москва, Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007, с. 22–35.

Application of the Bayesian method for automated identification of surface vessels

Polyakov Vadim Nikolaevich pvn23ki195@student.bmstu.ru
Nikolaev Pavel Viktorovich pnv11987@mail.ru
Korlyakova Maria Olegovna mkorlyakova@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of automated identification of surface vessels based on radar-derived features under conditions of incomplete or inaccurate data is considered. A modified naive Bayes classifier is presented, which accounts for the uniqueness of radiation sources and remains functional even when vessel length data is missing. It is shown that the proposed approach provides high discrimination capability for classes with distinctive features and demonstrates robustness to missing numerical data. It is concluded that the developed model can be effectively applied in maritime monitoring and passive radar systems.

Keywords: *machine learning, classification, Bayesian method, automated identification*

УДК 681.5.015.23

Разработка автоматизированного места калибровщика электрорадиоизмерительных приборов

Евтеева Дарья Михайловна meowwoww@rambler.ru
Корнюшин Юрий Петрович theroland@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено проектирование автоматизированного рабочего места калибровщика, предназначенного для повышения эффективности процесса калибровки измерительных приборов. Представлено техническое решение, включающее персональный компьютер, прецизионный калибратор и тестируемый цифровой мультиметр, объединенные в единую систему с программным управлением. Сделаны выводы о том, что разработанная система может применяться в метрологических службах промышленных предприятий для оценки метрологической пригодности мультиметров, а также может быть адаптирована для калибровки других измерительных устройств.

Ключевые слова: *автоматизация, рабочее место, калибровка, метрология, измерительные приборы, мультиметр, калибратор*

Современные требования к точности измерений в промышленности, энергетике, научных исследованиях и метрологическом обеспечении предъявляют все более высокие стандарты к процессу калибровки измерительных приборов. Традиционные ручные методы, основанные на визуальном снятии показаний и ручном вводе данных, не только трудоемки, но и подвержены ошибкам оператора, что снижает достоверность результатов и увеличивает время калибровки. В этих условиях актуальной становится задача автоматизации рабочих мест калибровщиков, что позволяет повысить как производительность, так и метрологическую надежность процедур. Особенно остро эта проблема стоит при массовой калибровке однотипных приборов, например цифровых вольтметров, амперметров, омметров, частотомеров, мультиметров и других средств измерений, которые широко используются в лабораториях и на производстве [1].

Целью данной работы является разработка и практическая реализация автоматизированного рабочего места (АРМ) калибровщика, предназначенного для калибровки цифровых мультиметров. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: проектирование архитектуры системы, включающей персональный компьютер, прецизионный калибратор и тестируемый мультиметр; разработка программного обеспечения для управления процессом калибровки и сбора данных; реализация алгоритмов автоматической генерации эталонных сигналов, регистрации показаний мультиметра и формирования отчетов; а также экспериментальная проверка работоспособности и эффективности разработанной системы [2].

В основе разработанной системы лежит трехкомпонентная архитектура: управляющий ПК, источник эталонных сигналов (калибратор) и тестируемый

цифровой мультиметр. Калибратор подключается к ПК через интерфейс USB и управляется с помощью специализированного программного модуля, реализованного на языке Python с использованием библиотек PyVISA и NumPy. Мультиметр также подключается к ПК через тот же интерфейс, что позволяет программно считывать его показания в режиме реального времени и отображать их на экране. Программное обеспечение включает в себя графический интерфейс пользователя, в котором задаются исходные параметры и условия калибровки. После запуска процедуры система автоматически последовательно устанавливает на выходе калибратора заданные эталонные значения сигналов, ожидает стабилизации показаний мультиметра, фиксирует измеренные значения и сохраняет их в структурированной базе данных. На завершающем этапе формируется протокол калибровки в формате .xlsx, содержащий таблицы результатов и заключение о соответствии прибора установленным метрологическим требованиям. Также в процессе калибровки на экране дисплея отображаются схемы электрических соединений для выполнения каждого из разделов методики калибровки [3]. На рис. 1 представлена архитектура автоматизированного рабочего места калибровщика.

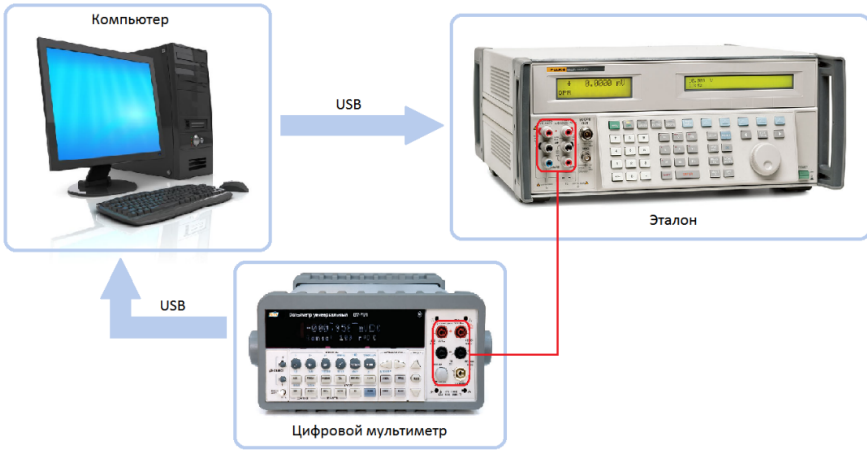


Рис. 1. Автоматизированное рабочее место калибровщика

Для проверки работоспособности автоматизированного рабочего места была проведена серия экспериментов с использованием прецизионного калибратора Fluke 5522A и цифрового мультиметра В7-78/1. Калибровка выполнялась в диапазонах постоянного и переменного напряжений, токов, электрического сопротивления и частоты, соответствующим установленным техническим характеристикам данного прибора. Всего было протестировано более 200 точек измерения. Сравнение результатов, полученных вручную и с помощью автоматизированной системы, показало полное совпадение чис-

ловых значений в пределах разрешающей способности приборов. При этом время выполнения полного цикла калибровки сократилось в среднем на 65 % — с 2 часов до 38 минут. Кроме того, исключены ошибки, связанные с неверным вводом данных или пропуском точек. Анализ погрешностей показал, что максимальное отклонение показаний мультиметра от эталонных не превышало значений, соответствующих классу точности прибора. Программное обеспечение продемонстрировало стабильную работу в течение длительных сеансов без сбоев [4]. На рис. 2 представлена диаграмма сравнения среднего времени калибровки при проведении процедуры вручную и с использованием автоматизированного рабочего места для разных типов приборов.

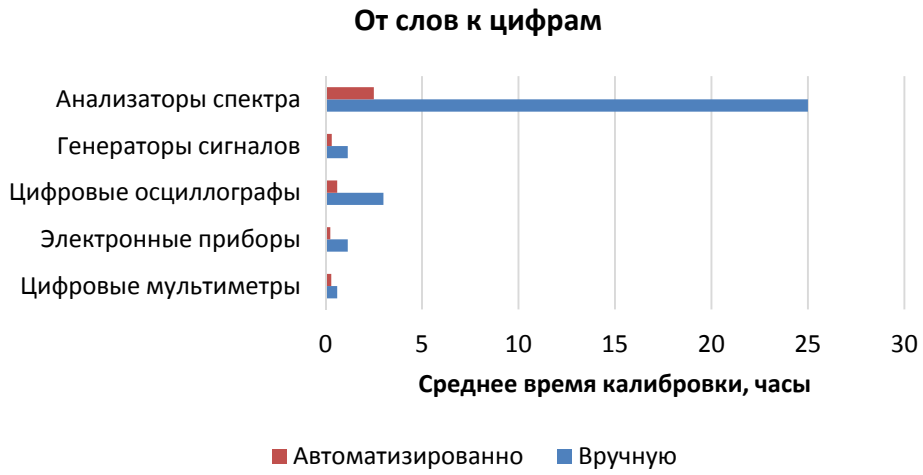


Рис. 2. Диаграмма сравнения калибровки вручную и с использованием автоматизированного рабочего места

Обсуждая полученные результаты, следует отметить, что предложенная система не только ускоряет процесс калибровки, но и повышает его воспроизводимость и отслеживаемость. Все этапы процедуры документируются автоматически, что соответствует требованиям стандартов ГОСТ ISO/IEC 17025 и упрощает аудит метрологических процессов. Важным преимуществом является гибкость программной части: изменение параметров калибровки не требует аппаратных модификаций, а добавление поддержки новых моделей приборов сводится к обновлению драйверов и файлов конфигурации. В перспективе систему можно расширить за счет подключения дополнительных каналов измерения, интеграции с корпоративной системой управления измерительным оборудованием, а также внедрения системы «машинного зрения», в целях автоматического распознавания результатов измерений с цифровых и аналоговых экранов различных приборов. При этом, конечно,

следует учитывать необходимость периодической поверки самого калибратора и обеспечения электромагнитной совместимости компонентов, особенно при работе с низкими напряжениями [5].

В заключение можно утверждать, что разработанное автоматизированное рабочее место калибровщика может успешно решать поставленные задачи. Оно обеспечивает высокую точность, скорость и надежность калибровки средств измерений, сводя к минимуму влияние человеческого фактора. Предложенная архитектура и программная реализация могут быть адаптированы для калибровки других типов измерительных приборов, что делает решение универсальным и востребованным в метрологической практике. Внедрение подобных систем на предприятиях и в аккредитованных лабораториях позволит повысить качество метрологического обеспечения и снизить эксплуатационные расходы.

Список источников

[1] Игнаткин В.У., Крещук В.В., Кривоцюк В.И., Грунский Н.Н., Якушкин М.А. *Автоматизация метрологического обслуживания средств измерений промышленного предприятия.* Москва, Изд-во стандартов, 1988, 208 с.

[2] Зданович И.А. *Экономическая эффективность и оптимизация метрологического обеспечения промышленных предприятий.* Москва, Изд-во стандартов, 1988, 160 с.

[3] Дубовой Н.Д., Осокин В.И., Поротов В.Н., Толчинский А.Д. *Автоматизация измерений и контроля электрических и неэлектрических величин.* Москва, Изд-во стандартов, 1987, 328 с.

[4] Гелашвили Н.В. *Автоматизация поверочных работ.* Москва, Машиностроение, 1987, 72 с.

[5] Романов В.Н. *Прогнозирование развития метрологии.* Москва, Изд-во стандартов, 1989, 176 с.

Development of an automated workstation for calibrating electro-radio measuring instruments

Evteeva Darya Mikhailovna meowwoww@rambler.ru
Kornyushin Yuriy Petrovich theroland@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The design of an automated calibrator workstation, aimed at improving the efficiency of the measurement instruments calibration process, is considered. A technical solution is presented, including a personal computer, a precision calibrator, and a digital multimeter under test, integrated into a single software-controlled system. Conclusions are made that the developed system can be used in metrology services of industrial enterprises for assessing the metrological suitability of multimeters, and can also be adapted for calibrating other measuring devices.

Keywords: *automation, workplace, calibration, metrology, measuring instruments, multimeter, calibrator*

УДК 681.513

Исследование систем управления движением автомобилей на основе нечеткого ПИД-регулирования

Чэнь Хао cheankh1@student.bmstu.ru
Мельников Дмитрий Владимирович melnikov_dv@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Нечеткая логика широко используется для управления объектами со значительной неопределенностью и нелинейностью, когда получение полноценных математических моделей затруднено. Для продольного движения автомобиля классический ПИД-регулятор обеспечивает простоту реализации и настройку по стандартным процедурам, однако при изменении условий движения и параметров среды часто наблюдаются ухудшение переходных характеристик и чувствительность к возмущениям. В настоящей работе исследуется подход Fuzzy-PID, при котором по текущим значениям e и de/dt регулятор выполняет онлайн-коррекцию (Kp, Ki, Kd), сохраняя простоту PID и добавляя адаптивность нечеткой логики.

Ключевые слова: *Fuzzy-PID, функции принадлежности, правила управления, MATLAB/ Simulink, устойчивость, точность*

ПИД-регулятор. ПИД-регулирование (пропорционально-интегрально-дифференциальное) — классический подход к формированию управляющего воздействия, широко применяемый в автоматике. Сигнал на выходе регулятора складывается из трех составляющих — пропорциональной (*P*), интегральной (*I*) и дифференциальной (*D*), — что позволяет обеспечить устойчивость и требуемые динамические свойства объекта. Путем подбора коэффициентов каждой из составляющих добиваются желаемой скорости реакции и качества переходного процесса. К ограничениям традиционного ПИД-подхода относят необходимость ручной настройки параметров и возможное снижение эффективности на нелинейных объектах либо при заметных вариациях параметров [1, 2].

Вычислительное уравнение ПИД-регулятора имеет вид

$$u = K_P e + K_I \int_0^t e dt + K_D \frac{de}{dt}. \quad (1)$$

Связь коэффициентов интегральной и дифференциальной составляющих с параметрами настройки может быть записана как:

$$K_I = K_P T_i \; K_D = K_P \frac{1}{T_d}. \quad (2)$$

Пропорциональная часть определяется выражением

$$P_{out} = K_P e, \quad (3)$$

где P_{out} — пропорциональная составляющая выходного сигнала;K_P — пропорциональный коэффициент усиления; e — текущая ошибка (рассогласование между заданием и измеренным выходом).

Интегральная часть имеет форму:

$$I_{out} = \frac{1}{T_i} \int edt = K_I \int edt, \tag{4}$$

где I_{out} обозначает интегральную составляющую выходного сигнала регулятора; T_i представляет время сброса или интегральное время; K_I обозначает интегральное усиление.

Дифференциальная составляющая записывается следующим образом:

$$D_{out} = T_d \frac{de}{dt} = K_D \frac{de}{dt}, \tag{5}$$

где D_{out} — дифференциальная часть выходного сигнала; T_d — дифференциальное время; K_D — дифференциальное усиление. На рис. 1 приведена структурная схема ПИД-регулирования.

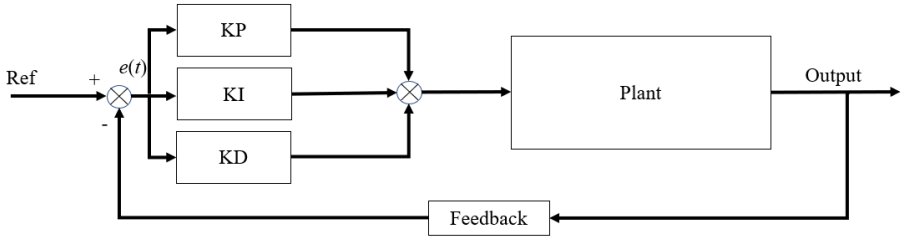


Рис. 1. Блок-схема ПИД-регулирования

Нечеткий регулятор. Нечеткий регулятор основан на методах нечеткой логики и применяется при отсутствии точной математической модели объекта управления или при ее существенной неопределенности (рис. 2). Работа регулятора сводится к четырем этапам:

– фаззификация — преобразование измеренных переменных в лингвистические термы с помощью функций принадлежности;

– база правил «ЕСЛИ–ТО», задающая соответствие между состояниями входов и требуемым управлением;

– нечеткий вывод (композиция max–min по схеме Мамдани), формирующий нечеткий результат;

– дефаззификация — получение скалярного управляющего воздействия, для чего используется метод центра тяжести. Такая структура обеспечивает гладкость изменения управляющего сигнала, устойчивость к шумам и неопределенностям и удобную экспертную настройку [3, 4].

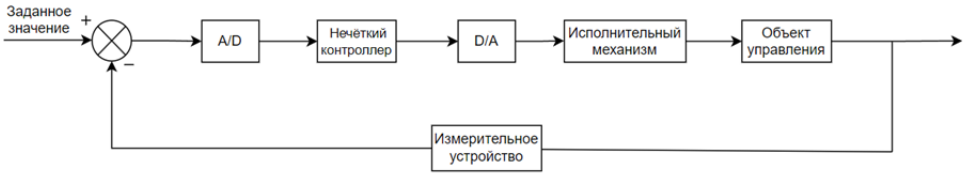


Рис. 2. Блок-схема нечеткого управления

На практике проектирование нечеткого управления удобно представлять как последовательность пяти этапов.

1. Нормирование и подготовка входных данных (квантование). Сначала выбираются входные переменные и их рабочие диапазоны, вводятся масштабные коэффициенты и, при необходимости, предварительная фильтрация. Такое нормирование обеспечивает сопоставимость значений и корректную работу функций принадлежности на последующих шагах.

2. Фаззификация (нечеткое преобразование). Количественные значения входов отображаются в лингвистические термы с помощью функций принадлежности (треугольные, трапециевидные, гауссовы и др.). Перекрытие термов позволяет корректно обрабатывать неопределенные и шумные наблюдения, а также задавать требуемую чувствительность в разных зонах диапазона.

3. База правил. Поведение регулятора задается системой правил вида «ЕСЛИ … ТО …», где комбинации термов входов сопоставляются с требуемым управляющим воздействием (или его параметрами). База правил должна быть компактной, непротиворечивой и покрывать типовые режимы; локальные поправки допускаются без нарушения уже отлаженных областей.

4. Механизм вывода. Для агрегирования активированных правил используется стандартная композиция (как правило, max–min по Мамдани) с последующим объединением частных выводов. Такой подход отражает принцип «экспертного» принятия решений и обеспечивает устойчивое формирование нечеткого результата при наличии нескольких активных правил.

5. Дефаззификация. Нечеткий результат преобразуется в скалярное управляющее воздействие. Чаще всего применяется метод центра тяжести; при повышенных требованиях к сглаженности дополнительно вводят ограничение темпа изменения и/или экспоненциальное усреднение. Это обеспечивает плавность выхода и технологичность реализации [5].

Нечеткий ПИД-регулятор. Нечеткий ПИД-регулятор представляет собой гибридную схему, в которой базовый ПИД сохраняет роль формирователя управляющего воздействия, а его коэффициенты Kp, Ki, Kd адаптируются в реальном времени на основе нечеткого вывода. В качестве входов FIS используются ошибка e и ее производная de/dt (в нормированных диапазонах), на выходе формируются приращения (ΔKp, ΔKi, ΔKd) либо масштабные коэффициенты для «перевзвешивания» ПИД-параметров. Такая организация позволяет сочетать интерпретируемость классического ПИД с робастностью

к неопределенностям и помехам, обеспечивая плавное управление и удобство инженерной настройки [6].

Разработанная блок-схема нечеткого ПИД-управления движением транспортного средства выглядит следующим образом (рис. 3):

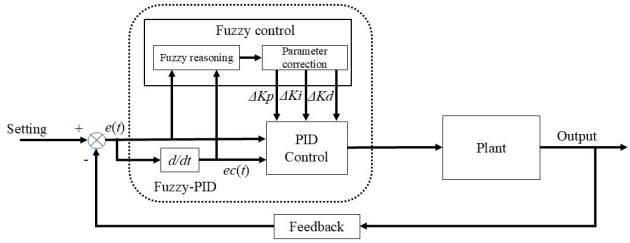


Рис. 3. Разработанная блок-схема движения транспортного средства с нечетким ПИД-управлением

На вход блока нечеткой логики подаются e и de/dt; по базе правил вычисляются приращения ΔKp, ΔKi, ΔKd, которые онлайн корректируют параметры базового ПИД. Это повышает быстродействие и уменьшает чувствительность к возмущениям при сохранении структуры классического регулятора [7].

Основная конфигурация нечеткого ПИД-регулятора для движения транспортного средства, предлагаемого в данной работе, выглядит следующим образом: Два входа: ошибка и производная ошибки; три выхода: Kp, Ki, Kd (рис. 4).

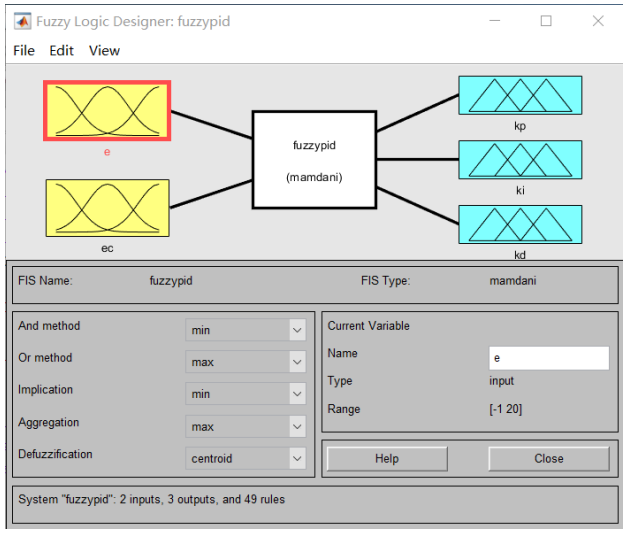


Рис. 4. Схема структуры нечеткого регулятора

Фузификация. На рис. 5 приведены диаграммы принадлежности для ошибки и производной ошибки между фактическими и желаемыми значениями в системе движения транспортного средства.

Показан редактор функций принадлежности Fuzzy Logic Toolbox. Для входной переменной *e* задано нормированное универсум-множество [−6; 6]: на краях используются гауссовы термы NB и PB (мягкое насыщение), в средней области — равномерные треугольники NM, NS, Z, PS, PM. Аналогичная разбиение применяется и для второй переменной ec, а также для выходов. Такое построение обеспечивает плавное перекрытие термов и устойчивое поведение при дефаззификации по центру тяжести.

Редактирование нечетких правил. Это редактор базы правил нечеткого регулятора. В таблице (рис. 6) представлена полная матрица из 7×7 = 49 правил.

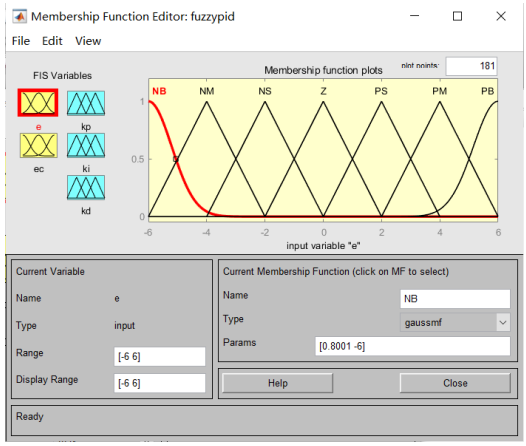


Рис. 5. Кривые функций принадлежности для входов и выходов

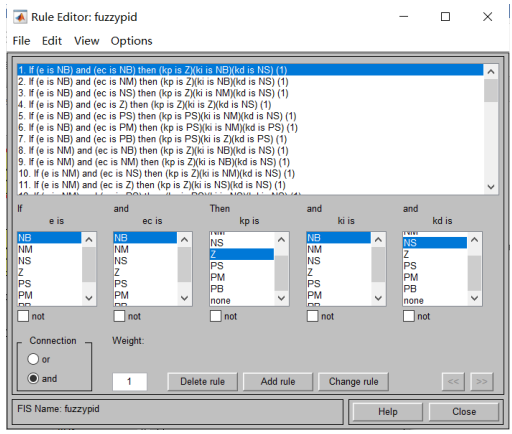


Рис. 6. Интерфейс редактирования нечетких правил

Правила формируют зависимость коэффициентов ПИД от знака и величины ошибки и ее производной; композиция реализуется как And = min, Or = max, веса правил по умолчанию равны 1.

Список источников

[1] Садулаев А.А., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Муртазова Х.Т. Проектирование автоматизированной системы управления параметрами микроклимата помещения пекарни. *Вестник ГГНТУ. Технические науки,* 2023, т. 19, № 2(32), с. 32–38. https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.95.14.004

[2] Тазеев Н.Ф. Автоматические системы управления котельными установками. *VI Мировые исследования в области естественных и технических наук. Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Ставрополь, Ставропольское издательство «Параграф», 2023, с. 102–103.

[3] Котляров Р.В., Пачкин С.Г. Моделирование нечеткой системы управления эмулятором печи овен. *Современные наукоемкие технологии*, 2020, № 9, с. 26–31.

[4] Mesropyan A.V., Sharipov R.R. On the efficiency of fuzzy logic applications in hydraulic actuator control systems. *Frontier Materials & Technologies*, 2019, № 2, с. 49–56.

[5] Voskoglou M.G. *Fuzzy logic in control theory*. *Digital Transformation Technology: Proceedings of ITAF 2020*. Singapore, Springer Singapore, 2021, с. 217–228.

[6] Шукирова А. Адаптивный нечеткий пид-регулятор системы управления углом наклона лопасти ветрогенератора. *Вестник КазАТК*, 2022, т. 121, № 2, с. 580–590.

[7] Шмидт И.А., Калинин И.А., Пономарева Н.А. ПИД-подобный нечеткий регулятор в сар расхода жидкости. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2021, № 38, с. 67–89.

Research of vehicle motion control systems based on fuzzy PID control

Chen Hao cheankh1@student.bmstu.ru
Melnikov Dmitry Vladimirovich melnikov_dv@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

Fuzzy logic is widely used to control objects with significant uncertainty and nonlinearity, where developing comprehensive mathematical models is difficult. For longitudinal vehicle motion, a classic PID controller offers ease of implementation and tuning using standard procedures. However, with changing driving conditions and environmental parameters, deterioration in transient response and sensitivity to disturbances are often observed. This paper explores the Fuzzy-PID approach, which uses the current values of e and de/dt to perform online correction (Kp, Ki, Kd), preserving the simplicity of PID while adding the adaptability of fuzzy logic.

Keywords: *Fuzzy-PID, membership functions, control rules, MATLAB/Simulink, stability, accuracy*

УДК 681.5.01

Об использовании оператора эволюции для описания потока данных

Герасимова Виктория Игоревна[1] **gerasimowa.victoria@yandex.ru**
SPIN-код: 7789-8950

Герасимов Даниил Игоревич[2]

[1] *КГУ им. К.Э. Циолковского, Россия, Калуга*

[2] *КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана Россия, Калуга*

Предложен обобщенный метод анализа динамических структур многомерных потоков данных на основе оператора эволюции и преобразования Гильберта. Подход не привязан к конкретной предметной области и применим к широкому классу сигналов. Эффективность метода продемонстрирована на примере различения звуковых сигналов. Предложенный подход открывает перспективы для интеграции с системами машинного обучения и применения в задачах распознавания паттернов в реальном времени, особенно в условиях помех и ограниченных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: *оператор эволюции, преобразование Гильберта, аналитический сигнал, парциальные корреляции*

В современных приложениях — от биомедицинской диагностики до телекоммуникаций и систем управления — часто возникает необходимость описания сложных многомерных сигналов. Такие данные, будь то электромагнитные поля, кардиосигналы, энцефалограммы или сетевой трафик, естественным образом представляются как непрерывные или дискретные временные ряды, формирующие многокомпонентный вектор $X(t) = = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_M(t)]^T$. При дискретизации времени этот вектор превращается в последовательность наблюдений $X(n)$, где $n = 1, 2, \dots, N$.

Для анализа динамики таких потоков эффективным инструментом выступает оператор эволюции, описывающий переход системы из одного состояния в другое во времени. Ранее данный подход успешно применялся для моделирования электромагнитных полей [1] и телекоммуникационного трафика [2]. В настоящей работе предлагается обобщенная формулировка метода оператора эволюции, применимая к любым типам многомерных потоков данных, независимо от их физической природы.

Ключевым шагом в построении обобщенной модели является переход к аналитическому (комплексному) представлению исходного сигнала с использованием преобразования Гильберта (ПГ). Для каждой компоненты $X_m(t)$ строится ее Гильберт-образ $Y_m(t)$ [3]:

$$Y_m(t) = X_m(t) \otimes h(t) = \frac{1}{\pi} VP \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X_n(t)}{(t-\tau)} d\tau;$$

$$X_m(t) = -Y_m(t) \otimes h(t),$$

где $V.P.$ — главное значение интеграла по Коши.

Функция $h(t) = 2/\pi t$ или ядро ПГ является импульсной характеристикой линейного нерекурсивного фильтра — фильтра Гильберта (ФГ), на выходе которого формируется ортогональное дополнение $Y_m(t)$ входного сигнала $X_m(t)$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} X_m(t) \cdot Y_m(t)dt = 0.$$

При этом $Y_m(t)$ тождественно не равен 0.

С помощью ПГ из исходного сигнала $X_m(t)$ формируют положительно-частотный аналитический сигнал $Z_m(t)$ с амплитудой $|Z_m(t)|$, фазой $\Phi(t)$ и частотой $\omega(t)$ [4, 5]:

$$Z_m(t) = X_m(t) + i\,Y_m(t) = |Z_m(t)|\,e^{i\cdot\Phi(t)};$$

$$|Z_m(t)| = \sqrt{{X_m}^2(t) + {Y_m}^2(t)};$$

$$\Phi(t) = arctg\frac{Y_n(t)}{X_n(t)},\ \omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}.$$

Динамика нормированного комплексного потока описывается соотношением [1]:

$$\boldsymbol{z}(s) = \widehat{\boldsymbol{S}}(s,p)\boldsymbol{z}(p), p < s,$$

где $\widehat{\boldsymbol{S}}(s,p)$ — оператор эволюции, формально задаваемый как неэрмитов проекционный оператор $\widehat{\boldsymbol{S}}(s,p) = \boldsymbol{z}(s)\boldsymbol{z}^{+}(p)$.

Для получения физически интерпретируемой и устойчивой модели оператор симметризуется, что приводит к эрмитову оператору эволюции:

$$\widehat{\boldsymbol{S}}^{э}(s,p) = \left[\widehat{\boldsymbol{S}}(s,p) + \widehat{\boldsymbol{S}}^{+}(s,p)\right]/2.$$

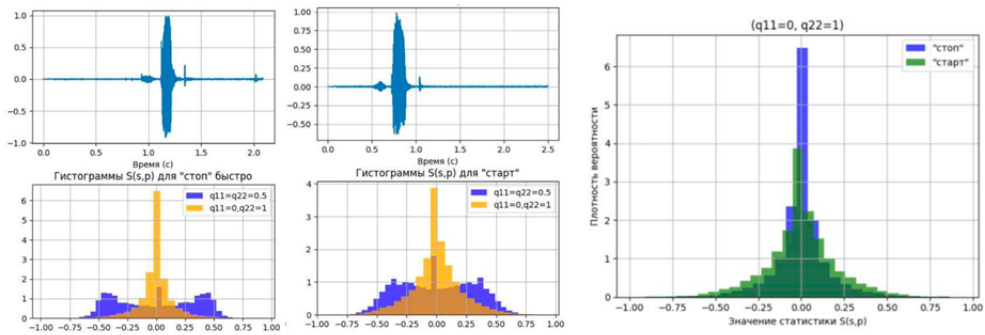
Его матричные элементы выражаются через нормированные компоненты $x_m(n)$ и $y_m(n)$, что позволяет явно выделить корреляционные связи между различными временными срезами и каналами данных.

Для количественного анализа динамических структур вводится статистический оператор значимости $\widehat{\boldsymbol{Q}}(s,p)$, учитывающий вес каждого канала и их взаимодействий. Усреднение эрмитова оператора эволюции по этому оператору дает скалярную величину — эволюционную статистику $S_{s,p} = \langle\widehat{\boldsymbol{S}}^{э}(s,p)\rangle = Sp\{\widehat{\boldsymbol{Q}}(s,p)\widehat{\boldsymbol{S}}^{э}(s,p)\}$. Эта статистика интерпретируется как парциальная парная корреляция между состояниями системы в моменты p и s. Она учитывает как автокорреляции отдельных компонент, так и межканальные взаимодействия, взвешенные по их значимости.

На основе множества таких значений строятся нормированные гистограммы $h(S_{s,p})$ — так называемые спектры парциальных парных корреляций. Эти спектры служат эмпирическими плотностями вероятности и обладают такими важными свойствами как инвариантность к временным сдвигам,

устойчивость к масштабированию амплитуды, сжатое и информативное представление динамической структуры [1, 2].

Метод был продемонстрирован на примере двух различных звуковых сигналов (старт и стоп). Для каждого сигнала формировались двухмерные потоки данных, включающие сам сигнал и его первую производную. При равных весах каналов $q_{1,1} = q_{2,2} = 0{,}5$ были построены гистограммы $h(S^{(1)}_{p-1,p})$, $h(S^{(2)}_{p-1,p})$, которые четко различали структуры сигналов, несмотря на их схожесть во временной области (см. рисунок).



Гистограммы аудиосигналов с разным весом каналов ($q_{1,1}$ — входящий сигнал, $q_{2,2}$ — его производная)

Этот результат подтверждает, что динамическая структура сигнала заключена не в его абсолютных значениях, а в характере его изменения, что особенно важно для задач распознавания паттернов и классификации.

Предложенный обобщенный подход на основе оператора эволюции и преобразования Гильберта позволяет эффективно снижать размерность данных, работать с односторонними спектрами, выделять устойчивые динамические признаки нестационарных сигналов.

Особую ценность представляет инвариантность получаемых статистик к временным и амплитудным искажениям, что делает метод перспективным для применения в реальных условиях.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную верификацию метода с зашумленными данными, оптимизацию вычислительных алгоритмов для работы в реальном времени, а также интеграцию с методами машинного обучения для автоматической классификации сигналов. Реализация этих направлений может значительно повысить надежность и эффективность современных систем обработки многомерных потоков данных, особенно в условиях ограниченных ресурсов и высокого уровня помех.

Список источников

[1] Краснов А.Е., Надеждин Е.Н., Никольский Д.Н., Галяев В.С. Прямые и обратные задачи реконструкции операторов эволюции в анализе динамики многомерных процессов. *Чебышевский сборник*, 2018, № 19(2), с. 217–233. https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-2-217-233

[2] Краснов А.Е. Оператор эволюции и его применение к анализу телекоммуникационных потоков данных. *Математика в современном мире. Всерос. науч.-практ. конф., посв. 110-летию со дня рождения советского математика, доктора физико-математических наук, профессора П.П. Коровкина: сб. ст.* Калуга, Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2024, с. 11–17.

[3] Kak S. Hilbert transform for discrete data. *International Journal of Electronics*, 1973, vol. 34, pp. 177–183.

[4] Герасимова В.И. Инвариантное распознавание сигналов. *Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (ARMIMP-2024). XVII Междунар. науч.-техн. конф.: матер.* Москва, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2024, с. 32–36.

[5] Герасимова В.И., Особенности выбора порядка цифрового фильтра Гильберта в задачах анализа сигналов. *Инженерные технологии*, 2025, № 1(9), с. 61–70.

On the use of the evolution operator to describe a data flow

Gerasimova Victoria Igorevna[1] gerasimowa.victoria@yandex.ru
SPIN-code: 7789-8950

Gerasimov Daniil Igorevich[2]

[1] *Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia*

[2] *TKSU, Kaluga, Russia*

The paper proposes a generalized method for analyzing dynamic structures of multidimensional data flows based on the evolution operator and the Hilbert transform. The approach is not tied to a specific domain and is applicable to a wide class of signals. The effectiveness of the method is demonstrated by distinguishing between sound signals. The proposed approach opens up opportunities for integration with machine learning systems and applications in real-time pattern recognition tasks, especially in the presence of noise and limited computational resources.

Keywords: *evolution operator, Hilbert transform, analytical signal, partial correlations*

УДК 62-503.54:51-74

Применение метода генерирующей модели для аппроксимации дискретного сигнала

Тихонова Екатерина Александровна tikhonovaea@student.bmstu.ru
Финошин Александр Викторович finoshin@bmstu.ru
Тихонов Александр Анатольевич tikhonovaa@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлена методика синтеза генерирующей модели, а также обоснован ее выбор в качестве метода аппроксимации дискретной функции. В задачах обработки дискретных сигналов выбор метода аппроксимации напрямую влияет на точность восстановления, вычислительную сложность и физическую интерпретируемость результата. Метод генерирующей модели представляет собой универсальный и гибкий инструмент аппроксимации дискретных сигналов произвольной природы, особенно в задачах управления, фильтрации и слежения, где важны не только точность, но и динамическая адекватность модели.

Ключевые слова: *генерирующая модель, слежение, аппроксимация*

Рассмотрим применение метода генерирующей модели для аппроксимации дискретных сигналов. Существенным недостатком классических методов аппроксимации (ряды Фурье, полиномы Лежандра и др.) является их применимость к ограниченному набору функций, обладающих исключительно периодическими или полиномиальными свойствами. Для расширения возможностей аппроксимации рассматривается подход на основе генерирующей модели (ГМ).

Генерирующей моделью будем называть динамическую систему заданной размерности, выход которой представляет собой желаемый сигнал [1]. Метод ГМ позволяет определить корни обобщенного характеристического уравнения авторегрессионной модели этого сигнала и на их основе сформировать набор базисных функций [2]. Аппроксимация исходного сигнала с заданной точностью достигается путем суммирования данных функций. Преимущество данного класса разложения заключается в его большей универсальности. Это становится особенно очевидным для сигналов сложной природы, которые включают не только периодические составляющие, но и экспоненциально затухающие колебания, или колебания с нарастающей амплитудой. В таких случаях классические методы аппроксимации часто оказываются непрактичными или вовсе неприменимы.

В отличие от традиционных подходов, где вычисляется коэффициенты разложения по фиксированному базису, предлагаемый метод определяет корни характеристического уравнения целевого сигнала, которые и формируют базисные функции. Даже для простейших сигналов применения генерирующей модели обеспечивает более высокую точность слежения и меньшее запаздывание по сравнению с методом эталонной модели [3].

Целью данной работы является обоснование применения метода генерирующей модели для аппроксимации дискретных сигналов сложной формы. Для этого необходимо решить следующие задачи: разработать программное обеспечение синтеза ГМ, теоретически обосновать преимущества метода, сравнить результаты аппроксимации с аппроксимацией в классическом базисе.

Поставим задачу для метода генерирующей модели.

Пусть желаемый сигнал f представлен в графической форме или в виде сеточной функции $f = \{f_1, f_2, \ldots, f_N\}$, где f_i — результат значения функции в момент времени t_i, $i = 1 \ldots N$. Требуется синтезировать линейную динамическую модель заданной размерности, выходной сигнал которой с требуемой точностью аппроксимирует целевой сигнал f.

Методика синтеза генерирующей модели базируется на методе структурного погружения. Метод исходит из предположения, что на ограниченном временном интервале задающее воздействие может быть описано авторегрессионной моделью:

$$f_k = \sum_{j=1}^{N} a_{N,j} f_{k-j}, \quad k = 1, \overline{2N+1}, \tag{1}$$

где N, $a_{N,j}$ — порядок и параметры авторегрессионной модели.

Методика синтеза ГМ включает в себя три этапа. В первую очередь определяется размерность авторегрессионной модели (1). Размерность N выбирается из условия невырожденности матрицы Z:

$$Z = \begin{pmatrix} f_k & f_{k-1} & \cdots & f_{k-N} \\ f_{k-1} & f_{k-2} & \cdots & f_{k-N-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{k-N} & f_{k-N-1} & \cdots & f_{k-2N-1} \end{pmatrix}.$$

На втором этапе определяются параметры $a_{N,j}$. На третьем этапе для разностного уравнения (1) формируется характеристическое уравнение для исходного сигнала в z-области:

$$Q(z) = \prod_{i=1}^{N} (z - \lambda_{z_i}) = z^N - \alpha_{N,1} z^{N-1} - \ldots - \alpha_{N,N-1} z - \alpha_{N,N} = 0, \tag{2}$$

где λ_{zi} — корни характеристического уравнения. Найдем корни характеристического уравнения в непрерывной области λ_{si}, используя формулу z-преобразования $\lambda_{s_i} = \frac{1}{h} \ln \lambda_{z_i}$, где h — шаг дискретизации. Полученные корни формируют характеристическое уравнение в s-области

$$P(s) = \prod_{i=1}^{N} (s - \lambda_{s_i}) = s^N + \beta_{N-1} s^{N-1} + \ldots + \beta_{N-2} s + \beta_0 = 0. \tag{3}$$

Корни характеристического уравнения определяет набор порождающих функций, сумма которых аппроксимирует исходный сигнал:

$$f(t)=\sum_{i=1}^{r} e^{\lambda_i t}(a_i\cos\omega_i t+b_i\sin\omega_i t)=\sum_{i=1}^{r}(c_i e^{(\lambda_i+j\omega_i)t}+c_i^{*}e^{(\lambda_i-j\omega_i)t}), \qquad (4)$$

где a_i, b_i, c_i, c_i^{*} — константы:

$$a_i=2\sum_{k=0}^{p_i-1}\tilde{c}_{ik}t^k;\ b_i=-2\sum_{k=0}^{p_i-1}\tilde{c}_{ik}^{*}t^k;\ c_i=\tilde{c}_{ik}+j\tilde{c}_{ik}^{*};\ c_i^{*}=\tilde{c}_{ik}-j\tilde{c}_{ik}^{*};$$

p_i — кратность i-го корня или пары комплексно-сопряженных корней, r — число различных корней.

В качестве примера, демонстрирующего преимущества использования рассмотренного метода, рассмотрим расчет ГМ для экспоненциально затухающего гармонического сигнала.

Желаемый выход задан дискретным значением функции

$$f(t)=e^{-\alpha t}\sin\omega t,\ \alpha=1,\ \omega=10 \qquad (5)$$

с шагом дискретизации сигнала $h = 0{,}01$: f = [0 0,009 0,195 0,287 0,374 0,456 …].

На рис. 1 представлен график задающего воздействия $f(t)$.

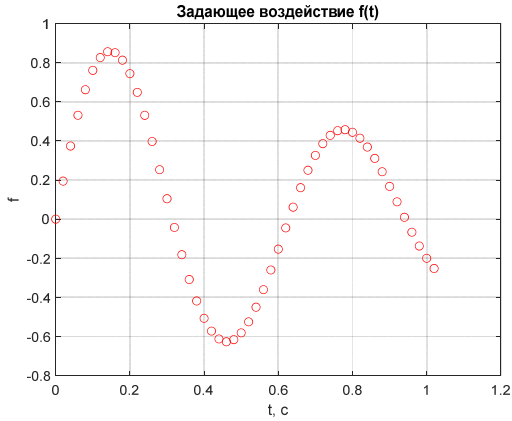


Рис. 1. График задающего воздействия

Получим характеристический многочлен измеряемого сигнала в дискретной области: $Q(z) = z^2 - 1{,}97z + 0{,}98$.

Корни характеристического уравнения $Q(z)$ равны $\lambda_{z1} = -0{,}9851 + 0{,}0988i$; $\lambda_{z2} = -0{,}9851 - 0{,}0988i$. Соответствующие корни в непрерывной области $\lambda_{s1} = -1 + 10i$; $\lambda_{s2} = -1 - 10i$.

Данным корням соответствует следующая сумма базисных функций:

$$f(t) = c_1 e^{-t} \sin 10t + c_2 e^{-t} \cos 10t, \tag{6}$$

где коэффициенты c_1 и c_2 находятся по методу наименьших квадратов путем подстановки дискретных значений функции в (6). Получим $c_1 = 1$, $c_2 = 0$, что приводит к искомой функции (5).

Проведем аппроксимацию сигнала (5) в базисе степенных функций методом наименьших квадратов с заданной точностью ε.

Аппроксимация выполняется методом наименьших квадратов, это значит, что коэффициенты многочлена $p_n(t)$ выбираются из условия минимума невязки:

$$\min_{c_0,\ldots,c_n} \sum_{i=1}^{N} [f(t_i) - p_n(t_i)]^2.$$

Качество аппроксимации оценивается по норме невязки:

$$\| f - \tilde{f} \| = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} [f(t_i) - p_n(t_i)]^2}.$$

Заданные уровни точности: ε = {0,50, 0,25, 0,10, 0,05, 0,01}. Степень полинома n увеличивается до тех пор, пока не будет достигнуто ограничение $n < 50$. На рис. 2 представлен график аппроксимации функции $f(t)$.

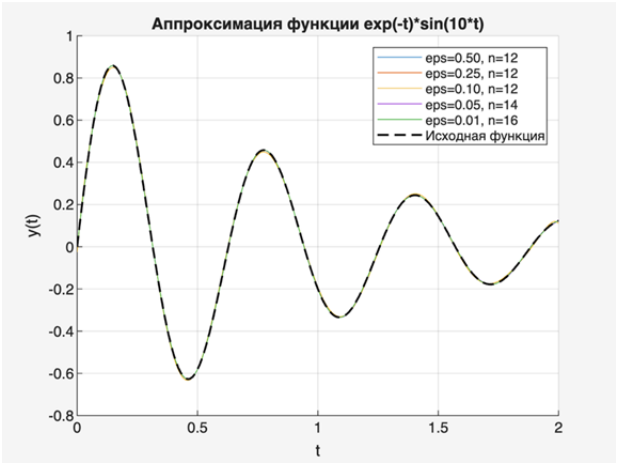


Рис. 2. График аппроксимации функции

При ε = 0,5, 0,25, 0,1 требуемая точность достигается уже при степени n = = 12 (полученная среднеквадратичная ошибка = 0,0980). При более строгих требованиях наблюдается следующий рост требуемой степени: при ε = 0,05 —

n = 14 (среднеквадратичная ошибка = 0,0133), при ε = 0,01 — n = 16 (среднеквадратичная ошибка = 0,0019) [4–6].

В данной работе рассмотрено применение метода синтеза генерирующей модели для аппроксимации заданной дискретной функции. На примере экспоненциально затухающего гармонического сигнала продемонстрированы преимущества данного подхода в сравнении с аппроксимацией в полиномиальном базисе. Снижение сложности модели и повышение точности достигается благодаря использованию методики, основанной не на разложении сигнала по заранее заданному базису, а на формировании базисной функции из корней характеристического уравнения авторегрессионной модели целевого сигнала.

Список источников

[1] Утробин Г.Ф., Мышляев Ю.И., Краснощеченко В.И., Мышляева С.В. Фильтрация дискретных сигналов методом структурного погружения. *Труды ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина»*, 2016, № 2, с. 36–44.

[2] Мышляев Ю.И. Об одном подходе к решению задачи слежения с желаемой спектральной динамикой. *Труды ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина»*, 2016, № 4, с. 5–11.

[3] Мышляев Ю.И., Кхаунг П.Ч., Долгов Я.А. Синтез алгоритмов слежения для линейных объектов с генерирующей моделью задающего сигнала. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2019, № 20(2), с. 72–79.

[4] Федоров А.А. Аппроксимационные методы анализа функций. *Вестник Московского университета. Серия математика и механика*, 2019, № 4, с. 32–38.

[5] Черненко Я.В. *Генерация синтетических данных методами машинного обучения.* Москва, Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023, 300 с.

[6] Finoshin A., Dolgov J. Synthesis of a generative model with the reference signal. *J. Math Sci.,* 2023, vol. 269, pp. 796–802. https://doi.org/10.1007/s10958-023-06317-0

Application of the generating model method for approximating a discrete signal

Tikhonova Ekaterina Aleksandrovna **tikhonovaea@student.bmstu.ru**
Finoshin Alexander Viktorovich **finoshin@bmstu.ru**
Tikhonov Alexander Anatolyevich **tikhonovaa@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper presents a method for synthesizing a generating model and justifies its choice as a method for approximating a discrete function. In discrete signal processing applications, the choice of approximation method directly affects the accuracy of reconstruction, computational complexity, and physical interpretability of the result. The generating model method is a versatile and flexible tool for approximating discrete signals of arbitrary nature, particularly in control, filtering, and tracking applications where both accuracy and dynamic model adequacy are crucial.

Keywords: *generating model, tracking, approximation*

УДК 004.032.26

Применение сверточной нейронной сети для определения состояния двери самолета

Романов Егор Сергеевич romanoves@student.bmstu.ru
Корлякова Мария Олеговна mkorlyakova@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен процесс разработки модели сверточной нейронной сети, решающей задачу классификации изображений, на основе предобученной модели MobileNetV2. Проведено детальное ознакомление с фреймворком машинного обучения Pytorch. Изучены методы предварительной обработки и аугментаций изображений. Также были изучены внутренняя структура и принципы функционирования MobileNetV2. Целью работы является изучение сверточных нейронных сетей и способов их применения для классификации состояния двери самолета.

Ключевые слова: *глубокое обучение, сверточные нейронные сети, компьютерное зрение, классификация изображений*

Сверточные нейронные сети (CNN) — это класс глубоких нейронных сетей, специально разработанных для обработки данных с сеточной структурой, таких как изображения. CNN демонстрируют высокую эффективность в задачах компьютерного зрения, включая классификацию изображений, обнаружение объектов и сегментацию. Сверточная нейронная сеть в основном включает следующие компоненты: входной слой, один или несколько сверточных слоев, функции активации, пулинг-слои, полносвязный слой и выходной слой [1].

Задача заключается в определении состояния двери самолета (открыта/закрыта) с целью вычисления временных интервалов, в течение которых дверь находится в процессе открытия или закрытия, а также в определении момента времени, когда дверь перешла в открытое состояние.

Набор данных, который был выбран для обучения, был мал, поэтому была применена аугментация данных, с помощью нее можно искусственно увеличить объем обучающей выборки. Также метод аугментации позволяет повысить устойчивость модели к изменениям внешних условий и предотвратить переобучение.

Основные виды аугментаций [2]:

– геометрические:
– поворот — изменение угла изображения;
– отражение — горизонтальное или вертикальное зеркальное отражение;
– изменение размера — увеличение или уменьшение изображения;
– обрезка — выделение части изображения.
– цветовые:
– изменение яркости — увеличение или уменьшение уровня света;

– контрастность — усиление или ослабление различий между тонами;

– насыщенность — изменение интенсивности цветов;

– добавление шума — добавление случайного шума для повышения устойчивости к помехам.

Для оценки качества предсказаний модели используется функция потерь (loss function), которая количественно измеряет расхождение между истинными метками и предсказанными значениями. В данной задаче, где целевая переменная принимает бинарные значения (0 или 1), применяется функция Binary Cross-Entropy [3], формула представлена ниже:

$$l_i = -w_i(y_i \cdot \log(\hat{y_i}) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \hat{y_i})),$$

где y_i— реальная метка; $\hat{y_i}$— предсказанная вероятность принадлежности к классу 1.

Общее значение функции потерь для выборки из N элементов можно вычислить как среднее арифметическое по всем элементам:

$$loss(y, \hat{y}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} l_i = mean(L).$$

Для реализации сверточных нейронных сетей (CNN) в рамках данного исследования был выбран фреймворк PyTorch. Его архитектурные особенности и гибкость делают его особенно подходящим для задач проектирования, обучения и оценки глубоких моделей.

В основе PyTorch лежит система многомерных массивов — тензоров, функционально совместимая с библиотекой NumPy, но обладающая ключевым преимуществом: поддержкой аппаратного ускорения вычислений за счет выполнения операций на графических процессорах (GPU) через интерфейс CUDA. Это позволяет существенно сократить время обучения моделей при работе с большими объемами данных.

Ключевым компонентом фреймворка является модуль Autograd — механизм автоматического дифференцирования, обеспечивающий вычисление градиентов функции потерь по параметрам модели. Эта функциональность лежит в основе алгоритма обратного распространения ошибки (backpropagation), что упрощает реализацию и отладку сложных архитектур.

Для построения нейросетевых моделей используется модуль torch.nn, предоставляющий набор параметризуемых и взаимозаменяемых компонентов: сверточные слои (Conv2d), полносвязные слои (Linear), функции активации (например, ReLU, Sigmoid), операции пространственного пулинга и другие. Такая модульность позволяет быстро конструировать и экспериментировать с различными архитектурами CNN.

Интеграция с CUDA реализована прозрачно для пользователя: перевод модели и данных на GPU осуществляется вызовом метода .to(device), после чего все последующие операции выполняются на ускорителе без необходимости изменения логики кода.

Также фреймворк включает в себя широкий спектр готовых алгоритмов оптимизации (модуль torch.optim), таких как стохастический градиентный спуск (SGD), Adam и RMSprop, а также стандартные функции потерь (CrossEntropyLoss, MSELoss, BCELoss и др.) в модуле torch.nn.

Для решения задачи была взята MobileNetV2, так у нее маленький размер и высокое быстродействие, а также обладает средней точностью среди других моделей.

MobileNet V2 — это одна из самых популярных архитектур сверточных нейронных сетей, разработанных Google для эффективной работы на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Она была представлена в 2018 году как улучшенная версия MobileNet V1 и быстро стала стандартом в области мобильного компьютерного зрения благодаря своей компактности, скорости и хорошей точности.

MobileNetV2 особенно полезна в задачах, где важны:

– малое энергопотребление;

– ыысокая скорость инференса;

– работа на слабых или мобильных устройствах.

Главной особенностью MobileNetV2 является использование инвертированных остаточных блоков (Inverted Residual Blocks) [4]. Это модификация обычного residual блока, используемого в ResNet, но адаптированная под вычислительную эффективность. Структура блока:

1) 1×1 Convolution (Expand Layer): первым шагом является расширение числа каналов входного изображения. Обычно используется коэффициент расширения равный 6. Например, если вход имеет 32 канала, после этой операции их станет 192. Используется функция активации ReLU6.

2) Depthwise Separable Convolution 3x3: после расширения применяется depthwise convolution — она обрабатывает каждый канал отдельно. Затем следует pointwise convolution (1×1), которая объединяет результаты. Такой подход значительно снижает количество вычислений по сравнению с обычной сверткой.

3) 1×1 Convolution (Project Layer): на этом этапе число каналов снова уменьшается до исходного значения. Эта часть называется «проекцией» и не использует нелинейную активацию.

4) Linear Activation: в отличие от других моделей, здесь используется линейная активация, чтобы избежать искажения информации при использовании skip connection.

5) Skip Connection (при совпадении размеров): если размер входного и выходного тензора совпадает, добавляется skip connection. Это позволяет сохранить информацию, минуя основные вычисления, что помогает в обучении глубоких моделей.

На вход модели требуется изображение 224×224 пикселя, но данные, которые использовались в обучении модели, имеют размер 640×360 пикселя. Чтобы привести изображение к нужному размеру, оно было обрезано до размера 360×360 с сохранением важной информации для последующей класси-

фикации. После изображение было сжато до необходимого размера. Для правильной работы модели помимо размера изображения его нужно преобразовать в тензор и нормализовать данные. На рис. 1 показано исходное изображение, поступающее на вход модели. На рис. 2 то же изображение после обработки, которое используется для обучения нейронной сети.



Рис. 1. Изображение до преобразований

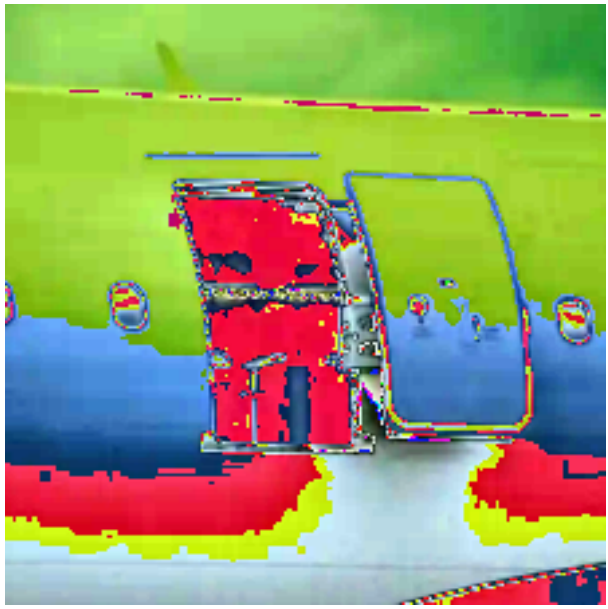


Рис. 2. Изображение после преобразований



Рис. 3. Пример тестовых данных состояния двери: закрыта (метка 0), открыта (метка 1)

Для тестирования модели было взято 10 изображений, модель показала точность — 90 % (рис. 3). На рис. 4 представлен график изменения потерь по эпохам.

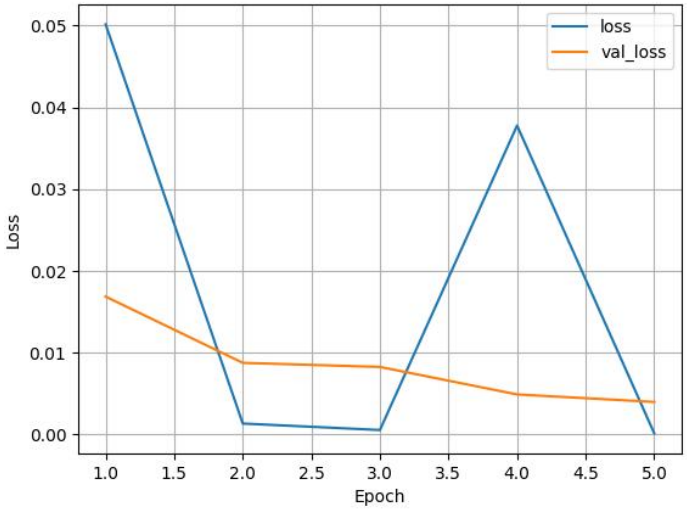


Рис. 4. График изменения потерь по эпохам

Список источников

[1] *Deep Learning with Python.* URL: https://www.mangoud.com/wp-content/uploads/2020/11/Francois-Chollet-Deep-Learning-with-Python-2018-Manning.pdf (дата обращения 07.09.2025).

[2] Долганов А.Ю., Ронкин М.В. *Глубокое обучение систем компьютерного зрения*. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2025, 128 с.

[3] *BCELoss*. URL: https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.BCELoss.html#torch.nn.BCELoss (accessed 07.09.2025).

[4] *MobileNet v2 Model*. URL: https://pytorch.org/hub/pytorch_vision_mobilenet_v2/ (accessed 07.09.2025).

Using a convolutional neural network to determine the state of an airplane door

Romanov Egor Sergeevich **romanoves@student.bmstu.ru**

Korlyakova Maria Olegovna **mkorlyakova@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper considers the process of developing a convolutional neural network model based on the pre-trained MobileNetV2 model. An introduction to the Pytorch machine learning framework, the MobileNetV2 structure, was conducted. The purpose of this work is to study convolutional neural networks and how they can be used for the task under consideration.

Keywords: *convolutional neural networks, computer vision, deep learning, image classification*

УДК 004.91

Автоматизация обработки и унификации табличных данных

Лысенко Олег Дмитриевич **olegkeatzin@yandex.ru**
Корлякова Мария Олеговна **mkorlyakova@yandex.ru**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен подход к автоматической унификации разнородных табличных данных. Система использует семантический анализ для сопоставления столбцов на основе их содержания и метаданных. Ключевой особенностью является генерация векторных представлений для каждого столбца с помощью языковых моделей (LLM) и последующая оптимизация этих представлений на основе метрического обучения. Описана архитектура системы, методология генерации и обучения векторов, а также приведены результаты экспериментов на синтетических данных

Ключевые слова: *унификация данных, семантический анализ, metric learning, обработка естественного языка*

В современных информационных системах данные часто поступают из множества источников, каждый из которых имеет собственную структуру и именование полей. Ручное приведение этих данных к единой схеме является трудоемким, дорогостоящим и подверженным ошибкам процессом. Автоматизация этого процесса, известного как унификация или сопоставление схем (schema matching), является актуальной научно-технической задачей.

Традиционные методы, основанные на сравнении имен столбцов или типов данных, неэффективны в случаях, когда семантическая близость не отражена лексически (например, «Стоимость» и «Цена»). С развитием моделей обработки естественного языка (NLP) и техник векторного представления слов и текстов (embeddings) появились новые возможности для семантического анализа.

Данная работа посвящена разработке системы, которая решает задачу унификации таблиц путем глубокого семантического анализа столбцов. Система генерирует описания для каждого столбца на основе его содержимого, получает их векторные представления и использует метрическое обучение (Metric Learning) для точного сопоставления.

Каждый столбец таблицы представляется структурой:

– имя столбца;
– примеры содержимого;
– описание столбца;
– векторное представление.

Описание столбца получается с помощью запроса к языковой модели:

Дай краткое описание для столбца таблицы с названием '{Имя столбца}'. Если по названию не понятно, что это за столбец, попробуй угадать на основе содержимого: {Примеры содержимого}. Описание должно быть универсаль-

ным, чтобы подходить для любых значений в этом столбце. Если столбец описывает что-то конкретное, думай шире — в столбце могут быть более разнообразные данные. Выведи только описание и ничего больше.

Полученное описание затем преобразуется в вектор через модель векторизации. Были протестированы две языковые модели (qwen3:8b [1] и saiga llama3 [2]) и две модели векторизации (embeddinggemma [3] и qwen3-embedding:8b [4]). Для тестирования был собран синтетический датасет с помощью python библиотеки Faker [5]:

– 1000 таблиц (около 10000 столбцов);

– 16 уникальных типов столбцов (классов);

– для каждого класса были использованы разные варианты написания названия и допущены орфографические ошибки.

Для визуализации разделения классов в векторном пространстве был использован алгоритм t-SNE [6]:

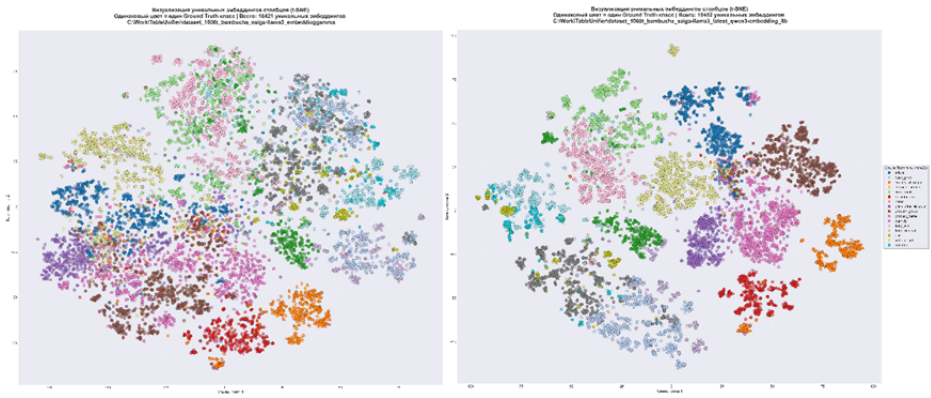


Рис. 1. Сравнение векторов, полученных через embeddinggemma (*слева*) и qwen3-embedding:8b (*справа*) на основе описаний от saiga llama3

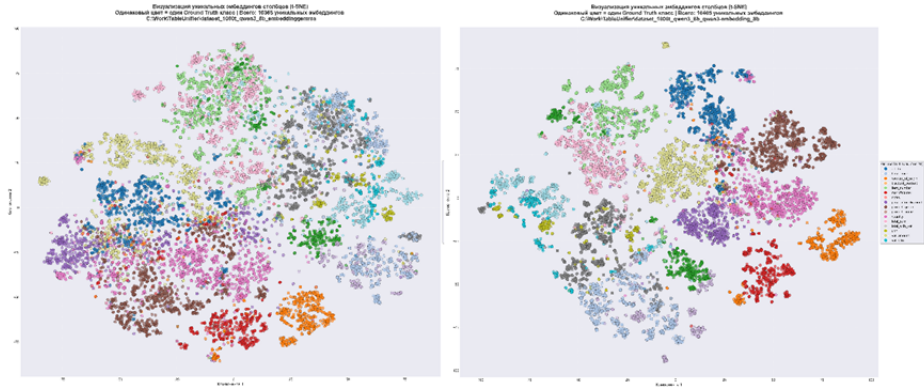


Рис. 2. Сравнение векторов, полученных через embeddinggemma (*слева*) и qwen3-embedding:8b (*справа*) на основе описаний от qwen3:8b

Как видно на рис. 1 и 2, лучше всего классы разделяет qwen3-embedding:8b с описаниями от qwen3:8b.

Стандартные модели векторизации не всегда создают достаточно хорошо кластеризованное пространство для специфической задачи сопоставления столбцов. Для решения этой проблемы используется дообучение модели с помощью metric learning [7]. Процесс обучения строится на «триплетах» данных:

– якорь (Anchor): вектор столбца из эталонной схемы (например, «Возраст»);

– позитивный пример (Positive): вектор семантически идентичного столбца из другой таблицы (например, «Полных лет»);

– негативный пример (Negative): вектор семантически далекого столбца (например, «Город»).

Цель обучения — минимизировать расстояние между якорем и позитивным примером и максимизировать расстояние между якорем и негативным примером. Это приводит к формированию плотных и хорошо разделенных кластеров для семантически схожих столбцов, что значительно повышает точность сопоставления.

Обучение проводилось на основе ранее представленного датасета. Модель состоит из одного линейного слоя. Датасет был разделен на три выборки: train (70 %), validation (15 %), test (15 %). Обучение шло 15 эпох, learning rate = 1e-3, margin = 0,4 (рис. 3).

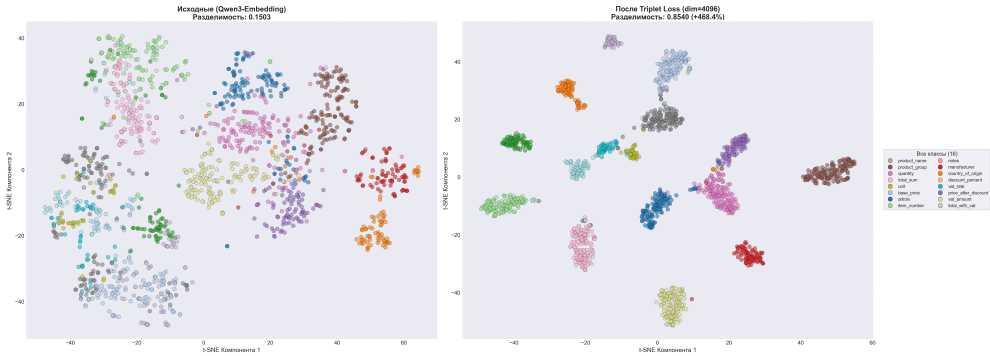


Рис. 3. Сравнение векторов в исходном пространстве (*слева*) и после модели проектора (*справа*)

Проверим, как будет вести себя модель для ранее не виданных классов (Zero-Shot) (рис. 4).

Результаты показали, что дообучение с помощью metric learning значительно улучшает качество сопоставления. Анализ t-SNE визуализаций векторов до и после обучения демонстрирует явное улучшение кластеризации семантически схожих столбцов. Система показала высокую точность на тестовых данных, содержащих сложные случаи синонимии и вариативности названий.

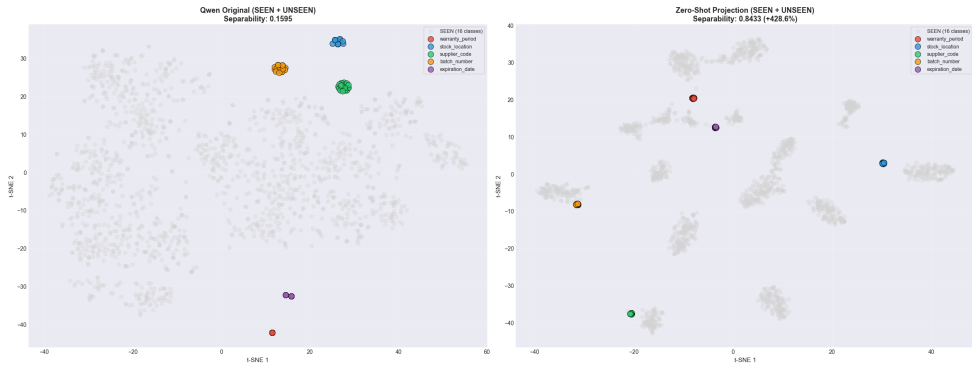


Рис. 4. Сравнение векторов в исходном пространстве (*слева*) и после модели проектора (*справа*)

Список источников

[1] Yang A., Li A., Yang B. *Qwen3 Technical Report*. URL: https://arxiv.org/abs/2505.09388 (accessed 29.10.2025).

[2] Гусев И. *Saiga*. URL: https://github.com/IlyaGusev/saiga (дата обращения 29.10.2025).

[3] *EmbeddingGemma: powerful and lightweight text representations*. URL: https://arxiv.org/abs/2509.20354 (accessed 29.10.2025).

[4] *Qwen3 Embedding: advancing text embedding and reranking through foundation models*. URL: https://arxiv.org/abs/2506.05176 (accessed 29.10.2025).

[5] *Daniele Faraglia*. URL: https://github.com/joke2k/faker (accessed 29.10.2025).

[6] *Theoretical Foundations of t-SNE for Visualizing High-Dimensional Clustered Data*. URL: https://arxiv.org/abs/2105.07536 (accessed 29.10.2025).

[7] *PyTorch Metric Learning*. URL: https://arxiv.org/abs/2008.09164 (accessed 29.10.2025).

Automated processing and unification of tabular data

Lysenko Oleg Dmitrievich **olegkeatzin@yandex.ru**

Korlyakova Maria Olegovna **mkorlyakova@yandex.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

An approach to the automated unification of heterogeneous tabular data is presented. The system uses semantic analysis to match columns based on their content and metadata. A key feature is the generation of vector representations for each column using language models (LLM), followed by the optimization of these representations through metric learning. The paper describes the system architecture, the methodology for generating and training the vectors, and presents the results of experiments on synthetic data.

Keywords: *data unification, semantic analysis, metric learning, natural language processing*

УДК 681.51:676:004.942

Разработка цифрового двойника узла роспуска макулатуры в среде разработки Simulink

Голенев Максим Кириллович maxopka04@yandex.ru
Финошин Александр Викторович finoshin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача разработки цифрового двойника гидравлической системы — узла роспуска макулатуры (УРМ), который является ключевым звеном в производстве бумаги *и картона из вторсырья. Ввиду сложности реального оборудования, настройка которого сопряжена с риском вызова аварийной ситуации, был создан цифровой двойник. Проведен анализ технологической схемы и цифровизация оборудования, включая центробежный насос, гидроразбиватель и вихревой очиститель, на основе их паспортных данных. Детально описан процесс создания модели с использованием библиотеки Simscape.*

Ключевые слова: *MATLAB, Simulink, цифровой двойник, узел роспуска макулатуры, гидравлическая система*

Узел роспуска макулатуры (УРМ) является первоначальным звеном в цепи производства бумаги и картона из вторичного сырья. Он определяет как качество конечного продукта, так и стабильность работы всего цикла создания бумаги [1]. Однако, являясь сложной гидравлической системой с высокой инерционностью, нелинейными характеристиками насосного оборудования, сложной гидродинамикой, оптимизация и настройка всей системы представляет значительную инженерную проблему [2]. Любые попытки экспериментальной настройки непосредственно на действующем оборудовании сопряжены с высоким риском вызова аварийной ситуации, нарушения технологического процесса, что может привести к выпуску брака, длительным простоям и повышенному износу агрегатов. Эффективным решением, которое позволяет преодолеть эти ограничения, становится применение модели цифрового двойника, основанной на технологической схеме реального промышленного узла [3].

Целью данной работы является разработка цифрового двойника узла роспуска макулатуры в среде MATLAB/Simulink с использованием блочного моделирования, предоставляемого библиотекой Simscape [4]. Модель предназначена для имитации динамических процессов в гидравлической системе и должна служить основой для последующего синтеза алгоритмов управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

Анализ объекта: проанализировать технологическую схему и паспортные данные реального промышленного оборудования, включая центробежный насос, гидроразбиватель и вихревой очиститель.

Разработка моделей компонентов: создать и настроить ключевые элементы гидравлической системы с использованием блоков библиотеки Simscape.

Создание модели: объединить все компоненты в единую систему.

Тестирование модели: провести моделирование работы системы при типовых режимах для проверки адекватности поведения модели и ее соответствия физическим принципам работы узла.

Общая схема разработанной модели представлена на рис. 1.

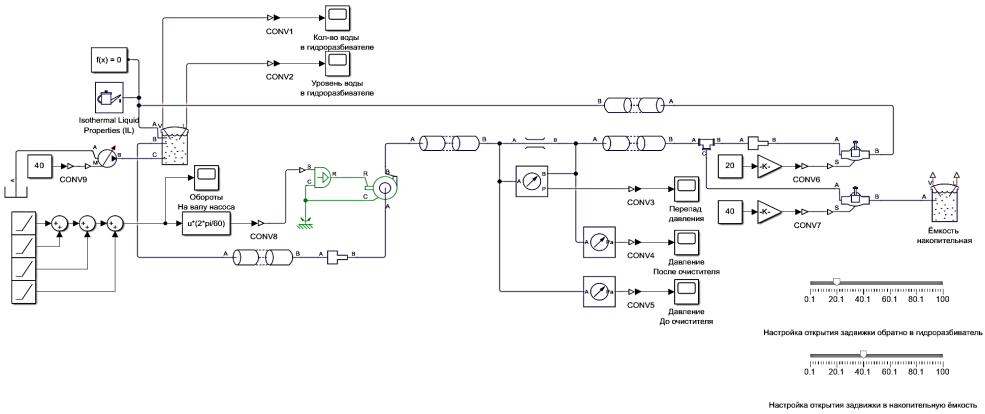


Рис. 1. Общая модель системы

Каждый основной элемент технологической схемы был представлен соответствующим математическим блоком, параметры которого задавались в соответствии с технической документацией.

Насос представлен блоком Centrifugal Pump (IL) с векторно заданной напорно-расходной и мощностной характеристиками [2]. Его рабочие характеристики изображены на рис. 2.

Гидроразбиватель представлен блоком Tank с табличным заданием характеристик.

Вихревой очиститель смоделирован как гидравлическое сопротивление блоком Flow Resistance, настроенным на создание паспортного перепада давления 1,5 бар при номинальном расходе 8000 л/мин

Трубопроводы представлены блоками Pipe с учетом реальных внутренних диаметров.

При построении модели были приняты следующие допущения:

– изотермичность процесса: температура жидкости считается постоянной, теплообменом с окружающей средой пренебрегается;

– свойства жидкости: бумажная масса рассматривается как однородная жидкость, ее плотность и вязкость принимаются равными свойствам воды;

– идеальность привода насоса: привод насоса моделируется как идеальный источник скорости, мгновенно отрабатывающий управляющий сигнал без учета инерционности электродвигателя.

– отсутствие перепадов высот: модель реализована в одной плоскости, перепады высот между оборудованием не учитывались.

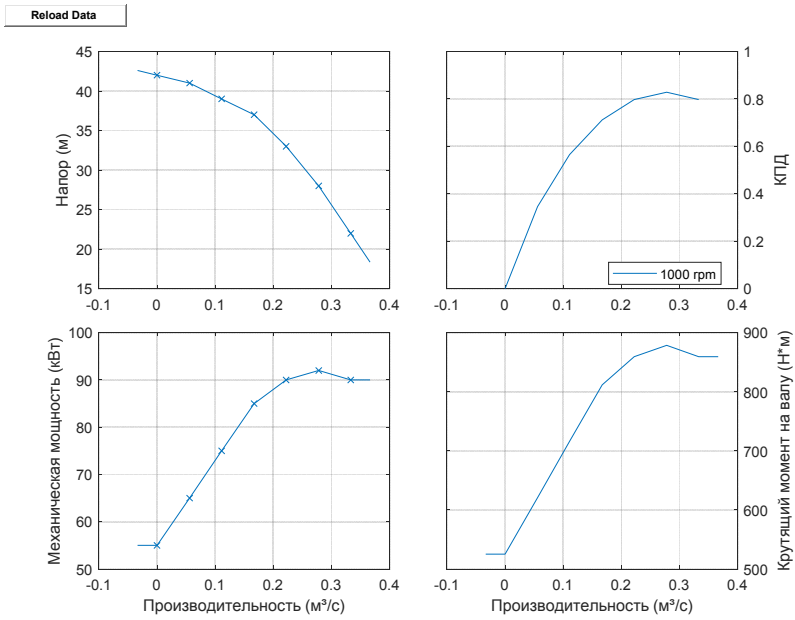


Рис. 2. Рабочие характеристики насоса

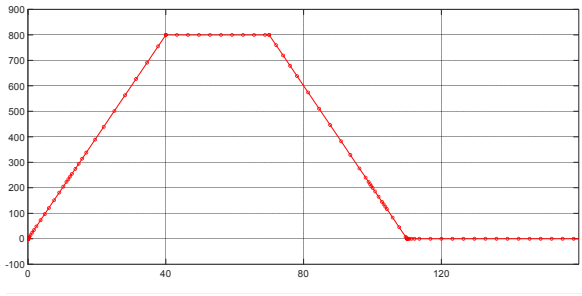


Рис. 3. Управляющий сигнал на насосе (об/мин)

Для тестирования разработанной модели и анализа ее динамических свойств были проведены эксперименты, имитирующие кратковременный пуск и остановку насоса при различных положениях задвижек, что позволяет оценить адекватность поведения модели. На вход имитатора привода насоса был подан управляющий сигнал, обеспечивающий плавный разгон до скорости 800 об/мин, работу на этой скорости в течение 30 секунд и последующую плавную остановку (рис. 3). В ходе симуляции регистрировался уровень жидкости в гидроразбивателе. Для его последующего анализа на соответствие физике реальных гидравлических процессов.

Первый режим работы имитирует работу системы, когда задвижка на линии в накопительную емкость закрыта, а задвижка на линии возврата в гид-

роразбиватель полностью открыта. Второй режим работы имитирует работу системы, при открытой задвижке только в накопительную емкость.

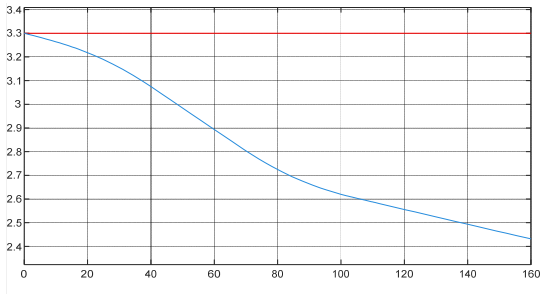


Рис. 4. Уровень воды в гидроразбивателе:
красный график — первый режим, *синий* — второй режим

Графики наглядно демонстрирует ожидаемое поведение, в первом режиме уровень жидкости остается прежним, тогда как во втором он непрерывно снижается. Это подтверждает, что модель правильно имитирует процесс перекачки жидкости из одной технологической точки в другую.

Список источников

[1] *Использование макулатуры в производстве картона и бумаги.* URL: https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=315 (дата обращения 29.10.2025).

[2] Флоринский М.М., Рычагов В.В. *Насосы и насосные станции.* Москва, Колос, 1967, 9 с.

[3] *Цифровые двойники в промышленности. Возможности и перспективы.* URL: https://ritm-magazine.com/en/node/8663 (дата обращения 27.10.2025).

[4] *MathWorks Steve Miller. What is simscape fluids?* URL: https://ww2.mathworks.cn/en/videos/simscape-fluids-overview-117985.html (accessed 27.10.2025).

Development of a digital twin of a waste paper pulping unit in the Simulink development environment

Golenev Maxim Kirillovich maxopka04@yandex.ru
Finoshin Alexander Viktorovich finoshin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of developing a digital twin of a hydraulic system — a waste paper pulping unit, which is a key link in the production of paper and cardboard from recycled materials, is considered. Due to the complexity of the real equipment, the adjustment of which is associated with the risk of an emergency situation, a digital twin was created. An analysis of the technological scheme and digitalization of the equipment, including a centrifugal pump, a hydropulper, and a centrifugal cleaner, was carried out based on their passport data. The process of creating a model using the Simscape libraries is described in detail.

Keywords: *MATLAB, Simulink, digital twin, waste paper pulping unit, hydraulic system*

УДК 519.651

Алгоритм синтеза генерирующей модели для дискретного зашумленного сигнала

Глушков Андрей Александрович glushkovaa@student.bmstu.ru
Финошин Александр Викторович finoshin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача восстановления непрерывной генерирующей модели сигнала по малому числу зашумленных дискретных отсчетов. Представлен метод, сочетающий идентификацию авторегрессионной модели минимального порядка методом структурного погружения, фильтрацию корней характеристического уравнения по физически обоснованным критериям и их последующую параметрическую корректировку. Показано, что предложенный подход позволяет с высокой точностью оценить параметры затухающих гармоник. Сделаны выводы, что метод можно применять для решения задач идентификации динамических систем и модального анализа.

Ключевые слова: *идентификация модели, авторегрессия, структурное погружение, затухающие гармоники, фильтрация корней, непрерывная модель*

Метод структурного погружения (МСП) позволяет идентифицировать минимальную структуру авторегрессионной модели дискретного сигнала на ограниченной выборке. В настоящей работе развивается данный подход для решения задачи восстановления непрерывной генерирующей модели сигнала по малому числу дискретных отсчетов в условиях аддитивного шума.

Ключевой особенностью предлагаемого метода является применение процедуры фильтрации корней характеристического уравнения в -области на основе физически обоснованных критериев: ограничения максимальной частоты колебаний (мнимая часть корней) и допустимого демпфирования (действительная часть корней). Это позволяет из множества корней дискретной AR-модели, включающих артефакты численного решения и влияние шума, выделить физически значимые компоненты сигнала и построить непрерывную генерирующую модель в виде суммы затухающих гармоник.

Рассматривается задача построения непрерывной модели сигнала $f(t)$ по его дискретным отсчетам $f_i = f(t_i) + \eta_i, i = 0,1, \dots, k$, где $t_i = ih$, h — шаг дискретизации; η_i — аддитивный шум измерений.

Предполагается, что исследуемый сигнал на ограниченном временном интервале может быть представлен в виде взвешенной суммы затухающих гармонических функций [1]:

$$f(t) = \sum_{j=1}^{m} e^{\sigma_j t}\left[A_j \sin\left(\omega_j t\right) + B_j \cos\left(\omega_j t\right)\right],$$

где σ_j — коэффициенты затухания (демпфирования); ω_j — частоты колебаний; A_j и B_j — амплитудные коэффициенты компонент.

Задача состоит в определении порядка модели, идентификации параметров $\{\sigma_j, \omega_j\}$ и восстановлении непрерывной генерирующей модели $f_g(t)$ с минимальной среднеквадратической ошибкой относительно измерений.

Шаги метода.

1. Идентификация дискретной AR-модели. На основе МСП определяется минимальный порядок N авторегрессионной модели измеряемого сигнала [2]:

$$f_k = \sum_{j=1}^{N} a_{N,j} f_{k-j} + v_k,$$

где коэффициенты $a_{N,j}$ находятся по алгоритму Грамма — Шмидта с последовательным расширением матрицы наблюдений Z до достижения критерия линейной зависимости с заранее выбранным параметром точности δ [3]:

$$\|q_{N+1}\| < \delta.$$

2. Вычисление корней в z- и s-областях. Характеристическое уравнение дискретной AR-модели

$$Q(z) = z^N - a_{N,1} z^{N-1} - \cdots - a_{N,N} = 0$$

решается численно [4]. Корни z_j преобразуются в -область по формуле:

$$s_j = \frac{1}{h} \ln(z_j).$$

3. Фильтрация корней. Применяются критерии отбора физически значимых корней:

– $|Im(s_j)| \leq$ — ограничение максимальной частоты;

– $|Re(s_j)| \leq \sigma_{max}$ — ограничение демпфирования.

Корни, не удовлетворяющие этим условиям, отбрасываются как артефакты численного решения или влияния шума.

4. Корректировка выбранных корней. Корректировка выбранных корней направлена на точное восстановление непрерывной модели сигнала: близкие по положению корни объединяются в группы, после чего их параметры σ и ω уточняются путем минимизации функционала ошибки между моделью и измеренными данными; затем пересчитываются амплитудные коэффициенты, что позволяет получить физически корректную и высокоточную аппроксимацию исходного процесса.

5. Построение непрерывной модели. Формируется передаточная функция $W(s)$ и непрерывная генерирующая модель:

$$f_g(t) = \sum_j \left[A_j e^{\sigma_j t} \sin(\omega_j t) + B_j e^{\sigma_j t} \cos(\omega_j t)\right],$$

где коэффициенты A_j, B_j определяются из начальных условий методом наименьших квадратов.

Работоспособность метода продемонстрирована на сигнале $f(t)$ вида

$$f(t) = e^{-t}\sin(10t).$$

Пример 1. Выборка из 100 точек, $h = 0{,}01$ с, уровень шума $\|\eta\| = 0{,}02$. Фильтрация и корректировка корней не применялись.

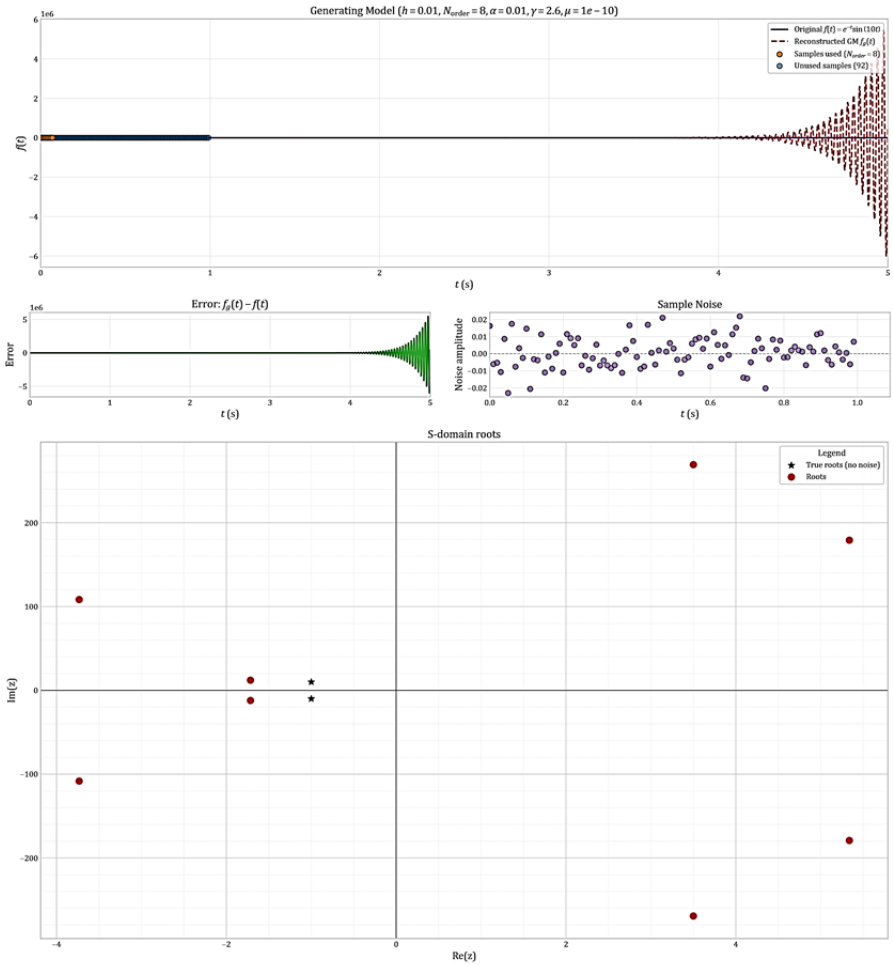


Рис. 1. Результаты моделирования для примера 1

Выборка показала корректный уровень сигнала. Автоматический выбор порядка -модели дал $N = 8$, коэффициенты оценены как $[a_1..a_8] =$ $= [0{,}8374;\ -0{,}1815;\ 0{,}0864;\ 0{,}3345;\ 0{,}2778;\ -0{,}0544;\ 0{,}4918; -0{,}9345]$.

Корни характеристического уравнения в -области после перехода в s-область оказались существенно удалены от ожидаемого затухающего комплекса $-1 \pm 10i$:

$$3{,}500 \pm 269{,}292i;$$
$$5{,}337 \pm 179{,}142i;$$
$$-3{,}733 \pm 108{,}321i;$$
$$-1{,}716 \pm 12{,}103i.$$

Несмотря на сравнительно низкую ошибку $MSE \approx 6{,}09$, модель не отражает истинную динамику сигнала: большинство корней лежит в областях, соответствующих неустойчивому поведению. На рис. 1 приведено сравнение исходной и восстановленной функций, а также распределение корней в -области.

Пример 2. Начальные условия аналогичны примеру 1. Используется фильтрация корней с параметрами $\omega_{max} = 3$ рад/c, $\sigma_{max} = 5$ (рис. 2).

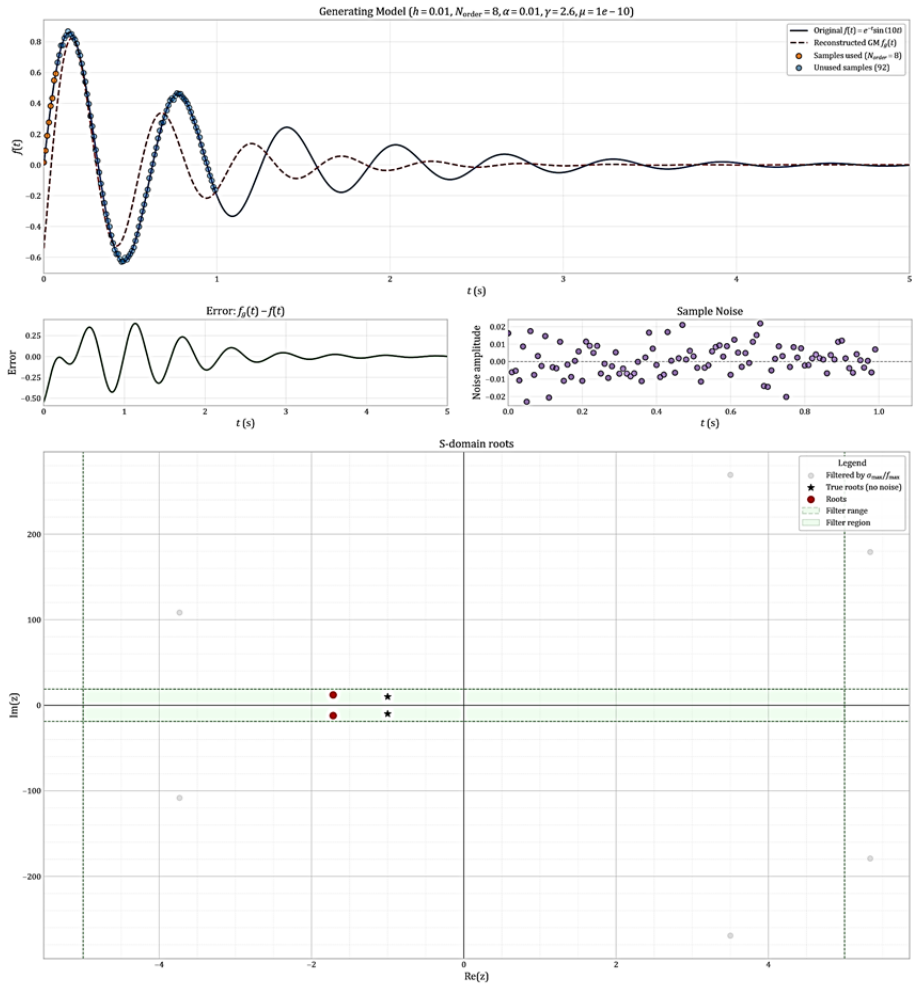


Рис. 2. Результаты моделирования для примера 2

После фильтрации оставлена только одна физически значимая пара корней:

$$s = -1{,}716 \pm 12{,}103i.$$

Все другие корни, обладающие слишком большой амплитудой или частотой, были отброшены как шумовые или численные артефакты. Группировка корней дала одну пару комплексных мод, что позволило надежно оценить коэффициенты непрерывной модели:

$$[a_1,\ a_2] = [-0{,}5431;\ 0{,}9515].$$

Полученная модель устойчива и описывает затухающие колебания, хотя ее корни все еще смещены относительно эталонных $-1 \pm 10i$, что сохраняет заметную погрешность. Среднеквадратическая ошибка $MSE \approx 6{,}13 \cdot 10^{-2}$.

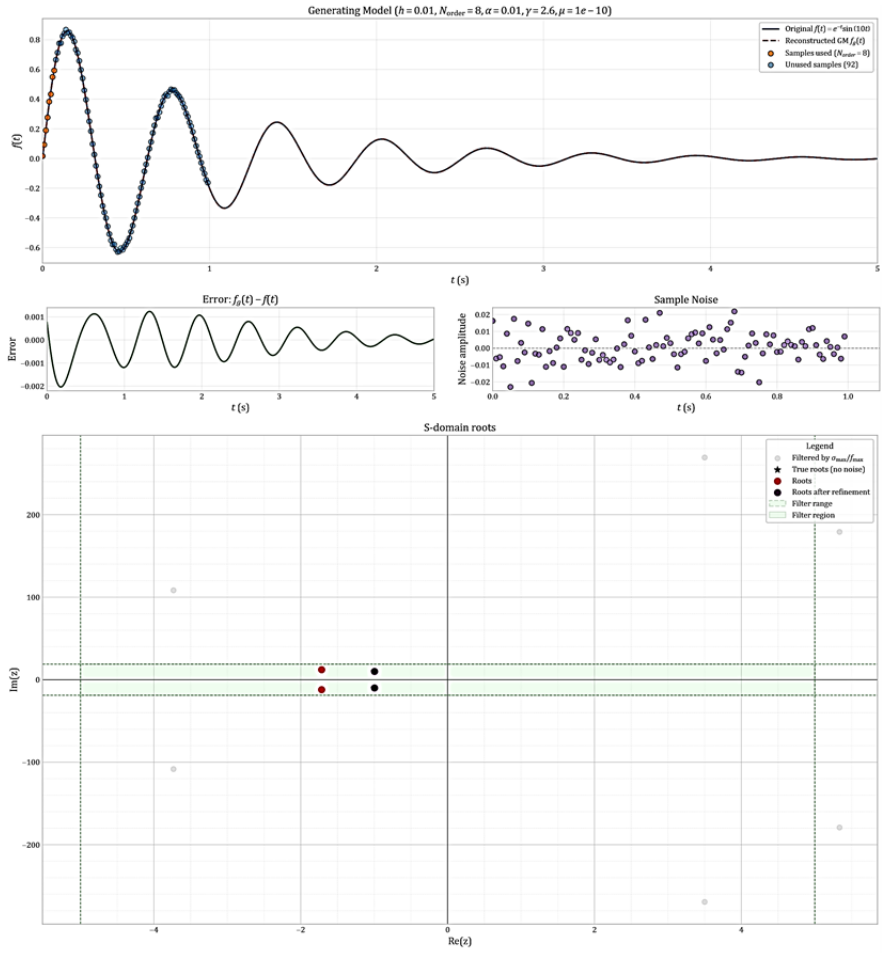


Рис. 3. Результаты моделирования для примера 3

Пример 3. Начальные условия аналогичны примеру 1. Используется фильтрация корней с параметрами $\omega_{max} = 3$ рад/c, $\sigma_{max} = 5$, а также корректировка отфильтрованных корней (рис. 3).

После проведения процедуры корректировки получены корни

$$s = -0{,}9955 \pm 10{,}0021i,$$

практически совпадающие с эталоном $-1 \pm 10i$: погрешность затухания $< 0{,}5$ %, частоты ~0,02 %. $MSE \approx 7{,}75 \cdot 10^{-5}$ более чем на два порядка ниже результата примера 2, что свидетельствует о почти идеальном соответствии модели исходному сигналу при уровне шума $\|\eta\| = 0{,}02$.

Символическое представление порождающей модели:

$$f_g(t) = \left(0{,}9969 \cdot sin(10{,}0021t) + 0{,}0008 \cdot cos(10{,}0021t)\right) \cdot e^{-0{,}9955t}.$$

Разработанный метод позволяет с высокой точностью восстанавливать непрерывную динамическую модель сигнала по ограниченному числу дискретных измерений в условиях аддитивного шума. Выполненные численные эксперименты подтверждают эффективность предложенной последовательности обработки: автоматическая структурная идентификация, фильтрация корней по физическим критериям и последующая параметрическая корректировка.

Комбинация этих этапов обеспечивает существенное повышение точности: среднеквадратическая ошибка снижается более чем на три порядка, что соответствует практически полному совпадению модельного отклика с исходными данными при уровне шума около 2 %. Метод не требует априорного выбора порядка модели, является универсальным и пригоден для работы с малыми выборками.

Список источников

[1] Утробин Г.Ф., Мышляев Ю.И., Краснощеченко В.И., Мышляева С.В. Фильтрация дискретных сигналов методом структурного погружения. *Труды ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина»,* 2016, № 2, с. 36–44.

[2] Утробин Г.Ф., Коляда Ю.И., Журавлев Р.Д. Оперативное определение порядка и коэффициентов нестационарной волновой структуры измеряемого сигнала. *Приборостроение*, 1989, № 5, с. 3–7.

[3] Мышляев Ю.И., Кхаунг П.Ч., Долгов Я.А. Синтез алгоритмов слежения для линейных объектов с генерирующей моделью задающего сигнала. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2019, № 20(2), с. 72–79.

[4] Тырсин А.Н. Построение моделей авторегрессии временных рядов при наличии помех. *Математическое моделирование*, 2005, т. 17, № 5, с. 10–16.

Algorithm for synthesizing a generative model of a discrete noisy signal

Glushkov Andrei Alexandrovich glushkovaa@student.bmstu.ru
Finoshin Alexander Viktorivich finoshin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This work addresses the problem of reconstructing a continuous generative model of a signal from a small number of noisy discrete samples. A method is presented that combines minimal-order autoregressive model identification using the structural immersion approach, filtering of the characteristic equation roots based on physically justified criteria, and subsequent parametric refinement. It is shown that the proposed approach provides highly accurate estimation of the parameters of damped harmonics. The results demonstrate that the method can be effectively applied to problems of dynamic system identification and modal analysis.

Keywords: *model identification, autoregression, structural immersion, damped harmonics, root filtering, continuous model*

УДК 004.852

Новый подход к дистилляции ризонинга

Сухацкий Максим Олегович loxterpoi@gmail.com
Корлякова Мария Олеговна mkorlyakova@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен новый подход к дистилляции знаний, ориентированный на перенос способностей к рассуждению от больших языковых моделей к более компактным. Описан процесс создания обучающего набора данных с использованием таких техник, как Chain-of-Thought (CoT), Program-of-Thought (PoT), Skip-Thinking, а также предлагаемой стратегии самокоррекции Razor-of-Thought (RoT). Обучение проводилось на модели Qwen3-1.8B с применением метода Supervised Fine-Tuning и фреймворка LoRA. Результаты демонстрируют, что дообученная модель достигает передовых показателей в своем классе, что подтверждает эффективность метода для создания вычислительно эффективных и мощных языковых моделей.

Ключевые слова: *обработка естественного языка (NLP), машинное обучение, дистилляция знаний, цепочка мышления, программа мышления, Skip-мышление, Qwen3*

В последние годы наблюдается стремительное развитие и повсеместное внедрение систем обработки естественного языка (NLP). Однако широкое применение крупных языковых моделей (LLM), таких как GPT-4, сталкивается с рядом серьезных ограничений. Основные проблемы связаны с колоссальными вычислительными затратами как на этапе их обучения, так и при последующем развертывании, особенно на устройствах с ограниченными ресурсами.

Эффективным решением этих проблем является разработка и применение методов уменьшения размера нейронных сетей без значительной потери производительности. Один из наиболее перспективных подходов в этой области — дистилляция знаний [1]. Суть этого метода заключается в том, что более компактная модель («ученик») обучается воспроизводить поведение значительно более крупной и мощной модели («учителя») [2, 3].

В исследовании акцент сделан на специфическом аспекте дистилляции — переносе не просто фактологических знаний, а именно способностей к рассуждению. Представляется новый метод генерации высококачественного обучающего датасета, который объединяет стандартные подходы с уникальной стратегией самокоррекции. Это позволяет передать малой модели более глубокие навыки логического мышления, анализа и последовательного вывода заключений.

Основой исследования стал авторский датасет, сгенерированный с использованием пула из девяти API-ключей и многопоточной архитектуры для достижения максимальной эффективности. В качестве моделей-учителей выступили передовые разработки:

– **qwen-3-235b-a22b-thinking-2507 / gpt-oss-120b**: использовались для генерации пошаговых логических рассуждений;

– **qwen-3-235b-a22b-instruct-2507**: применялась для генерации разнообразных вопросов;

– **qwen-3-coder-480b**: была задействована для создания вопросов в области программирования и алгоритмов, а также для формирования соответствующих рассуждений.

Датасет был сгенерирован для 35 000 уникальных вопросов из 10 различных предметных областей. Для каждого вопроса было создано несколько вариантов рассуждений с использованием четырех ключевых стратегий:

– **Chain-of-Thought (CoT)**: прямое и последовательное рассуждение, имитирующее человеческий мыслительный процесс шаг за шагом [2, 4];

– **Program-of-Thought (PoT)**: рассуждение, интегрированное с блоками кода на языке Python для выполнения точных вычислений и алгоритмических операций;

– **Skip-Thinking**: атомарное рассуждение, при котором мыслительный процесс разбивается на дискретные, независимые блоки, заключенные в теги <chunk_start> и <chunk_end> [5];

– **Razor-of-Thought (RoT)**: предлагаемая стратегия, в рамках которой модель сначала намеренно генерирует ошибочное рассуждение, а затем проводит его анализ, объясняет суть допущенной ошибки и предоставляет правильный ответ. Эта техника направлена на обучение модели навыкам самокоррекции и умению избегать распространенных логических ошибок.

Для повышения качества и надежности сгенерированных данных был применен метод самосогласованности (Self-Consistency). Для одного и того же вопроса генерировалось несколько вариантов ответа, и в качестве итогового выбирался наиболее часто встречающийся. Этот подход обеспечил дополнительную валидацию и отбор наиболее вероятных и корректных рассуждений.

В качестве модели-ученика была выбрана **Qwen3-1.7B**, отличающаяся хорошим соотношением производительности и размера. Обучение проводилось с помощью техники **Supervised Fine-Tuning (SFT)**, которая позволяет донастроить предварительно обученную модель на специфическом наборе данных.

Для эффективного дообучения без значительных вычислительных затрат была использована библиотека **Unsloth**, реализующая метод низкоранговой адаптации **(Low-Rank Adaptation, LoRA)**. LoRA позволяет значительно сократить количество обучаемых параметров, что делает процесс дообучения доступным даже при ограниченных ресурсах.

Процесс обучения модели состоял из трех эпох со следующими ключевыми параметрами:

– **разделение датасета**: 98 % данных для обучения и 2 % для тестирования;

– **оптимизатор**: Lion_8bit;

– **функция потерь**: кросс-энтропийная, стандартная для задач языкового моделирования;

– **планировщик скорости обучения:** LinearSchedulerWithWarmup с косинусной стратегией снижения скорости обучения после фазы «прогрева»;

– **размер батча**: 2.

Результаты. По результатам проведенных циклов обучения были получены показатели, представленные в сравнении с базовой моделью и моделью, дообученной на публичном датасете ZeroAgency/ru-thinking-reasoning-r1-v2. Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение качества дистилляции

Бенчмарк (больше — лучше)	Qwen3-1.7B (базовая)	Qwen3-1.7B + LoRA	Qwen3-1.7B + LoRA Adaptive Thinking	Qwen3-1.7B + LoRA Adaptive Thinking + RoT
MathLogicQA	0.320	0.252	0.390	0.4
ruMultiAr	0.220	0.000	0.241	0.25
ruModAr	0.293	0.000	0.491	0.498
MaMuRaMu	0.344	0.278	0.542	0.58
SimpleAr	0.706	0.820	0.971	0.981
ruHuman Eval	0.000	0.000	0.400	0.5

Как видно из таблицы, модель, дообученная с использованием стратегий Adaptive Thinking и RoT, демонстрирует значительное превосходство над базовой моделью и моделью, обученной на датасете ZeroAgency/ru-thinking-reasoning-r1-v2, на всех представленных бенчмарках. Это свидетельствует о том, что модель успешно освоила предложенные стратегии рассуждений для решения широкого круга задач, а также научилась генерировать рабочий код на языке Python.

Для дальнейшего повышения результатов был проведен эксперимент, в котором модели была предоставлена возможность использовать интерпретатор Python для выполнения сгенерированного кода и возвращать результат его исполнения в качестве финального ответа. Результаты сравнения приведены в табл. 2. Результаты показывают, что предложенный подход с использованием интерпретатора Python позволяет малой модели не только достигать, но и превосходить производительность таких крупных моделей, как Qwen2.5-Max и GPT-4o, на специализированных задачах.

Был успешно реализован и апробирован подход к дистилляции знаний, направленный на перенос сложных навыков рассуждения от крупных моделей-учителей к компактной модели-ученику [1, 2]. Создание уникального, высококачественного датасета, включающего инновационную стратегию самокоррекции (RoT), в сочетании с эффективным применением техник SFT и LoRA позволило добиться значительного улучшения рассуждающих способностей модели Qwen3-1.8B.

Таблица 2

Сравнение качества дистилляции с «читерством»

Модель	ruMultiAr (больше — лучше)	MathLogicQA (больше — лучше)
Qwen2.5-Max	0.591	0.775
GPT-4o	0.411	0.528
Qwen3-1.7B + LoRA Adaptive Thinking + интерпретатор Python	0.537	0.452
Qwen2.5-Math-1.5B	0.251	0.349
Qwen3-1.7B + LoRA Adaptive Thinking + RoT + интерпретатор Python	0.620	0.520

Полученная в результате исследования модель демонстрирует производительность, сопоставимую с современными решениями в своем классе, при значительно меньших требованиях к вычислительным ресурсам. Это подтверждает целесообразность и высокую эффективность предложенного подхода для создания нового поколения компактных и мощных инструментов искусственного интеллекта.

Список источников

[1] Li Ch., Chen Q., Li L., Wang C., Li Y., Chen Z., Zhang Y. *Mixed Distillation Helps Smaller Language Model Better Reasoning*. URL: https://arxiv.org/abs/2312.10730 (дата обращения 29.10.2025).

[2] Шиянов В. *Дистилляция знаний*. URL: https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/distillyaciya-znanij (дата обращения 29.10.2025).

[3] Chen X., Zhou S., Liang K., Sun X., Liu X. Skip-Thinking: Chunk-wise chain-of-thought distillation enable smaller language models to reason better and faster. URL: https://arxiv.org/abs/2505.18642 (accessed 29.10.2025).

[4] Hinton G., Vinyals O., Dean J. *Distilling the knowledge in a neural network.*. URL: https://arxiv.org/abs/1503.02531 (accessed 29.10.2025).

[5] Wei J., Wang X., Schuurmans D., Bosma M., Chi E., Le Q., Zhou D. *Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models*. URL: https://arxiv.org/abs/2201.11903 (accessed 29.10.2025).

A new approach to reasoning distillation

Sukhatsky Maksim Olegovich loxterpoi@gmail.com
Korlyakova Maria Olegovna mkorlyakova@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article examines an innovative approach to knowledge distillation aimed at transferring complex cognitive abilities, particularly reasoning skills, from large teacher language models to compact student models. A method for creating a specialized dataset with the

involvement of several advanced teacher models is described. During data generation, multi-step reasoning techniques such as Chain-of-Thought (CoT), Program-of-Thought (PoT), and Skip-Thinking were used. A key feature of the work is the introduction of a unique Razor-of-Thought (RoT) strategy based on a self-correction mechanism. The main goal of the study is to demonstrate the possibility of significantly reducing the computational complexity of a neural network while maintaining or even enhancing its ability to perform complex logical operations.

Keywords: *natural language processing (NLP), machine learning, knowledge distillation, Chain-of-Thought, Program-of-Thought, Skip-thinking, Qwen3*

УДК 004.932.72'1

Детектирование двери и люка самолета при помощи YOLO

Щеглов Владислав Андреевич shcheglovvladislav@mail.ru
Корлякова Мария Олеговна mkorlyakova@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено применение нейросетевой модели YOLO для задачи детектирования люков, дверей самолета и людей. Представлена адаптация модели под специфику авиационных объектов, включая обучение на специализированном датасете. Показано, что добавление класса «люди» повышает стабильность детекции основных объектов в сценах с частичным перекрытием. Особое внимание уделено проблемам освещения и вариативности форм. Сделаны выводы, что разработанный подход демонстрирует высокую эффективность и может применяться для интеграции в реальные системы авиационного контроля.

Ключевые слова: *детектирование объектов, YOLO, компьютерное зрение, нейронные сети, машинное обучение*

В авиационной отрасли критически важно обеспечивать безупречное техническое состояние воздушных судов и точность всех операций. Традиционно контроль состояния самолетов осуществляется визуальным осмотром специалистами, что может приводить к человеческим ошибкам и требует значительных временных затрат. Это особенно критично при подготовке к рейсам или в условиях срочного техобслуживания, когда необходимо быстро и точно выявлять даже малейшие дефекты. Технология детекции объектов на основе искусственного интеллекта может стать эффективным решением этой проблемы. Она позволяет не только автоматически обнаруживать повреждения корпуса, люков, дверей и других критических элементов, но и анализировать их состояние в реальном времени. Это помогает выявлять потенциальные риски на ранней стадии и предотвращать возможные аварии.

Задачи:

– разметить видеоданные для задачи детекции;
– собрать датасет с размеченными данными;
– обучить модель обнаруживать люки, двери самолета;
– дообучить модель обнаруживать людей;
– протестировать модель на тестовых данных.

Детекция объектов (Object Detection) — это одна из ключевых задач компьютерного зрения, которая заключается в обнаружении и локализации объектов на изображениях или видео [1]. В отличие от классификации, где нужно лишь определить наличие объекта, детекция также находит его точное местоположение с помощью ограничивающих рамок (bounding boxes), масок (при сегментации) или ключевых точек. Основными компонентами данной задачи являются: классификация — определение класса объекта

и локализация — нахождение координат объекта (обычно в форме [x_min,y_min, x_max, y_max], но может отличаться). Чтобы убедиться в том, что объект обнаружен правильно используют разные метрики оценки качества детекции, например:

– точность (Precision) — доля правильно обнаруженных объектов среди всех предсказанных [2]:

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)},$$

где TP — истинно положительные примеры; FP — ложноположительные примеры;

– полнота (Recall) — доля найденных объектов среди всех истинных [2]:

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)},$$

где FN — ложноотрицательные примеры;

– mAP (Mean Average Precision) — средняя точность по всем классам при разных порогах IoU [3]:

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i,$$

где N — количество классов; P_i — средняя точность для *i*-го класса;

– IoU (Intersection over Union) показывает, насколько предсказанный bbox совпадает с истинным [4].

Модели классификации. Наиболее популярный подход к классификации изображений — сверточные нейронные сети (CNN). Модели CNN: ResNet, MobileNet ,VGGNet. CNN предсказывают только класс объекта, чего не достаточно для задачи детектирования, так как нужны точные координаты обьекта. Для этого в исследовании была использована модель YOLO.

Аугментация данных. Аугментация (рис. 1), или генерирование новых данных на основе имеющихся, позволяет довольно просто и дешево решить часть проблем с обучающей выборкой подручными способами. Часто для увеличения выборки изображений применяют следующие преобразования: случайный горизонтальный поворот, случайная яркость и контраст цветов, случайная резкость, нелинейные искажения и т. п.

Разметка видеоданных и сборка датасета. Для обучения модели YOLO был собран датасет, состоящий из изображений (рис. 2) и видеофрагментов, содержащих двери, люки самолета и людей. Разметка данных проводилась с использованием инструмента CVAT в формате YOLO (текстовые файлы с аннотациями в формате class_id x_center y_center width height).

Классы объектов: дверь самолета, люк самолета, человек.

Источники данных: аэропортовые видеозаписи; снимки в интернете.

Всего размечено около 30000 изображений, распределенных между обучающей, валидационной и тестовой выборками в соотношении 70:15:15. Для

увеличения количества выборки была применена аугментация для каждого видеофрагмента и изоюражения. Для аугментации данных были применены методы: горизонтальное отражение (flip), рандомный кроп, изменение яркости и контраста и поворот на определенный угол).



Рис. 1. Пример аугментации (поворот + отражение)



Рис. 2. Видеофрагмент аэропортовой записи

Обучение модели YOLO. В качестве базовой модели использовалась YOLOv8 (предобученная на COCO) [5]. Обучение проводилось с использованием фреймворка Ultralytics.

Параметры обучения (двери и люки): размер изображения: 640×640; Batch size: 128; количество эпох: 100,355,1799; оптимизатор: AdamW; Learning rate: 0.001.

Параметры дообучения (люди): размер изображения: 640×640; Batch size: 16; количество эпох: 100; оптимизатор: AdamW; Learning rate: 0.0001.

Обучение проводилось на GPU nvidia A100

Тестирование модели. Для оценки качества модели использовался тестовый набор данных (700 изображений). Качество детекции будет оцениваться по метрике mAP50-95 (средняя точность модели при разных порогах IoU).

Оценка качества модели

Количество эпох	mAP50-95
100	0,8353
355	0,6929
1799	0,8339

На основе представленных в таблице данных можно сделать вывод о том, что лучший результат для модели: 100 эпох. Результат отображен на (рис. 3). К 355 эпохам качество детектирования падает, предположительно из-за переобучения, но длительное обучение — 1799 эпох частично компенсирует это возвращаясь к результату 100 эпох.



Рис. 3. Пример инференса обученной модели на тестовом изображении

Список источников

[1] *Детекция объектов в компьютерном зрении.* URL: https://data-light.ru/blog/detekciya-obektov-v-kompyuternom-zrenii/ (дата обращения 27.10.2025).

[2] *Precision and Recall.* URL: https://habr.com/ru/articles/661119/ (accessed 27.10.2025).

[3] *Mean Average Precision.* URL: https://learnopencv.com/mean-average-precision-map-object-detection-model-evaluation-metric/ (accessed 27.10.2025).

[4] *Intersection over Union in object detection.* URL: https://www.superannotate.com/blog/intersection-over-union-for-object-detection (accessed 27.10.2025).

[5] *Модель YOLOv8.* URL: https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolov8/ (дата обращения 27.10.2025).

Aircraft door and hatch detection with YOLO

Shcheglov Vladislav Andreevich shcheglovvladislav@mail.ru
Korlyakova Mariya Olegovna mkorlyakova@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The detection task is to determine the presence and location of objects in an image or video. It includes not only classification, but also localization of objects using bounding boxes. The application of the YOLO neural network model for the task of detecting hatches, aircraft doors and people is considered. The model is adapted to the specifics of aviation facilities, including training on a specialized dataset. It is shown that the addition of the "people" class increases the stability of detection of the main objects in scenes with partial overlap. Special attention is paid to the problems of lighting and variation of shapes. It is concluded that the developed approach demonstrates high efficiency and can be used for integration into real aviation control systems.

Keywords: *object detection, YOLO, computer vision, neural networks, machine learning*

УДК 004.91

Внедрение инструментов Microsoft 365 для оптимизации управления данными в бизнес-процессах предприятия

Кундик Елизавета Александровна kea23ki132@student.bmstu.ru
Макаренков Александр Михайлович makarenkov.am@bmstu.ru
SPIN-код: 8134-5720

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен процесс внедрения инструментов Microsoft 365 для оптимизации управления данными в бизнес-процессах предприятия ООО «Ново Нордиск». Реализованные решения включают: использование Power Automate для автоматизации потоков данных и документооборота; применение Excel, Outlook и SharePoint для централизованного хранения и обработки данных; внедрение Power BI для работы с большими объемами информации, создания дашбордов и ежедневного мониторинга ключевых показателей деятельности линий на предприятии.

Ключевые слова: *автоматизация бизнес-процессов, оптимизация, управление данными, Microsoft 365, Power Automate, Power BI, Excel, SharePoint, аналитические дашборды, графики дежурств*

С каждым годом информационные технологии все шире применяются для оптимизации бизнес-процессов и управления данными на предприятиях различных отраслей. Особенно актуально это для задач, связанных с обработкой больших объемов информации и регулярным формированием документов. Ранее многие процессы, включая составление графиков дежурств и подготовку аналитических отчетов, выполнялись вручную: сотрудники самостоятельно собирали данные, формировали таблицы в Excel, рассчитывали показатели и вручную строили графики. Такой подход требовал значительных трудозатрат и повышал риск ошибок и задержек.

На фармацевтических предприятиях к информационным системам предъявляются повышенные требования: каждое новое решение сопровождается большим объемом документации и строгими процедурами валидации. В этих условиях особенно востребовано использование инструментов Microsoft 365, поскольку их внедрение не требует внешних интеграций и осуществляется в пределах локальной корпоративной сети. Это позволяет минимизировать риски, снизить нагрузку по подготовке отчетности и в то же время обеспечить высокую степень автоматизации процессов.

В качестве решения задачи автоматизированного формирования графиков дежурств была разработана система, основанная на интеграции Excel, SharePoint, Outlook и Power Automate. Ее основная цель заключается в обеспечении эффективного управления данными о дежурствах и автоматической генерации персональных графиков с последующим сохранением и рассылкой сотрудникам без ручного вмешательства.

Источником информации служат файлы Excel. В качестве базы используется унифицированный шаблон, в который подставляются персональные данные сотрудников и сведения о дежурствах. Дополнительно применяется файл «График», размещенный на SharePoint, содержащий распределение дежурств по неделям и инициалы сотрудников [1]. Он включает три рабочих листа: основной график, список сотрудников и календарь праздничных дней. Такая структура обеспечивает формализованный ввод данных и их корректную обработку системой.

Функциональная часть решения реализована с использованием Office Scripts для обработки информации в Excel и Power Automate для построения логики потоков [2, 3]. После загрузки обновленного файла на SharePoint система автоматически фиксирует изменение и запускает процесс обработки [4]. Скрипты считывают данные, учитывают праздничные дни и формируют индивидуальные графики, которые сохраняются в отдельной папке SharePoint с уникальными именами файлов. Далее Power Automate автоматически отправляет готовые документы сотрудникам по корпоративной почте. При этом система фиксирует статусы выполнения и при возникновении ошибок уведомляет ответственного специалиста.

В качестве следующего этапа внедрения инструментов Microsoft 365 была разработана система автоматизированной аналитики с использованием Power BI [5]. Основная цель системы заключалась в оптимизации управления большими массивами данных и создании наглядных дашбордов для мониторинга производственных показателей предприятия. Данные для анализа собираются из корпоративных баз данных, содержащих информацию о производственных сериях, работе линий, времени выполнения операций и ключевых показателях эффективности.

Созданные дашборды позволяют централизованно управлять данными, обеспечивая их автоматическую агрегацию и ежедневное обновление без участия сотрудников. С помощью формул и функций DAX выполняются расчеты показателей, которые ранее рассчитывались вручную в Excel, что позволяет минимизировать ошибки и существенно сократить трудозатраты. Визуальные элементы дашбордов, такие как графики, таблицы и KPI-карточки, предоставляют возможность отслеживать динамику показателей и своевременно выявлять отклонения. Внедрение Power BI позволило превратить графики, которые ранее использовались исключительно для отчетов, в инструмент ежедневного мониторинга.

В дальнейшем возможны следующие направления улучшения: автоматизация графиков дежурств с учетом отпусков; расширение системы на другие подразделения и внедрение уведомлений для сотрудников о сменах; создание интерактивных дашбордов для анализа дополнительных показателей бизнес-процессов; использование дополнительных инструментов Microsoft 365, таких как Power Apps.

Список источников

[1] *Microsoft Corporation. Output Excel table data as JSON for usage in Power Automate.* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/office/dev/scripts/resources/samples/get-table-data (accessed 07.07.2025).

[2] *Microsoft Corporation. Office Scripts in Excel.* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/office/dev/scripts/overview/excel (accessed 04.07.2025).

[3] *Microsoft Corporation. Power Automate in Microsoft 365.* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/power-automate/ (accessed 01.07.2025).

[4] *Microsoft Corporation. Use SharePoint and Power Automate to build workflows.* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/power-automate/sharepoint-overview (accessed 07.07.2025).

[5] *Power BI documentation.* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/power-bi (accessed 08.08.2025).

Implementation of Microsoft 365 tools for data management optimization in enterprise business processes

Kundik Elizaveta Aleksandrovna kea23ki132@student.bmstu.ru
Makarenkov Aleksandr Mikhailovich makarenkov.am@bmstu.ru
SPIN-code: 8134-5720

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article presents the implementation of Microsoft 365 tools to optimize data management and automate business processes at Novo Nordisk LLC. The solution integrates Excel, SharePoint, Outlook, Power Automate, and Power BI into a single system that improves efficiency, accuracy, and transparency. An automated workflow for duty schedule generation and distribution was created using Power Automate, with data processing in Excel, file storage in SharePoint, and delivery via Outlook. Power BI dashboards enable daily monitoring of production performance with automated updates, metric calculations, and KPI visualization, supporting real-time decision-making. The use of Microsoft 365 increases data accuracy, speeds up workflows, and ensures scalability for future development and integration with other systems.

Keywords: *business process automation, optimization, data management, Microsoft 365, Power Automate, Power BI, Excel, SharePoint, Outlook, dashboards, duty schedules*

УДК 004.032.26

Алгоритм классификации изделий на яркостно-частотно-временной диаграмме излучения

Гудилин Илья Павлович gudilinip@student.bmstu.ru
Корлякова Мария Олеговна korlyakova@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен процесс реализации алгоритма классификации изделий на яркостно-частотно-временной диаграмме излучения на основе сверточной нейронной сети с использованием среды программирования Python. Проведено изучение принципов работы сверточной нейронной сети, также проведена разработка программы, классифицирующей тестовые файлы яркостно-частотно-временных диаграмм с помощью алгоритма на основе CNN. Целью работы является изучение алгоритма классификации на основе сверточной нейронной сети, разработка программы для анализа данных, выбранных для рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: *сверточные нейронные сети, CNN, обработка данных, анализ данных*

Сверточные нейронные сети (CNN) — это класс глубоких нейронных сетей, которые обладают специализированной архитектурой для обработки данных, имеющих пространственную структуру, таких как изображения. Они широко применяются в компьютерном зрении, распознавании образов, анализе временных рядов и других задачах, где важно учитывать пространственные зависимости между данными.

Из преимуществ CNN можно выделить следующее: автоматическое выделение признаков. CNN самостоятельно обнаруживает локальные паттерны краев, текстур, форм без ручного проектирования признаков. Также она обладает инвариантностью к небольшим трансформациям. Эффективность по отношению к пространственным данным. Меньше параметров, чем в полносвязных сетях, благодаря разделению весов. Оптимизировано для изображений (2D), видео (3D), временных рядов (1D преобразованных в 2D). Сверточная нейронная сеть имеет иерархическое обучение, а также меньшее количество параметров по сравнению с полносвязными сетями свертки, которые используют общие ядра для всего изображения. Пулинг уменьшает размерность данных. Как результат быстрее обучение, меньше риск переобучения [1].

Из недостатков CNN можно выделить следующее: требовательность к данным, ее необходимость в больших датасетах, сложность интерпретации, не всегда легко понять, какие именно признаки влияют на решение. Ограниченная работа с последовательностями, CNN слабо учитывают долгосрочные зависимости во временных рядах или текстах, а также высокая требовательность к вычислительным мощностям и возможная потеря пространственной информации при использовании MaxPooling.

Смоделированные в среде программирования MATLAB файлы с импульсами разделены на 5 классов, в каждом классе находится свой тип импульсов с определенным положением, размером и уровнем зашумленности. Поэтому первым делом была выполнена задача по выделению значимых импульсов и игнорированию шумов. Порог рассчитывался индивидуально для каждого файла, что повысило точность обработки.

Как рассчитывается IQR (рис. 1): первый квартиль (Q1) — это значение, которое делит набор данных на две части, где 25 % данных меньше этого значения, а 75 % больше. Третий квартиль (Q3) — это значение, делящее набор данных на две части, где 75 % данных меньше этого значения, а 25 % больше [2].

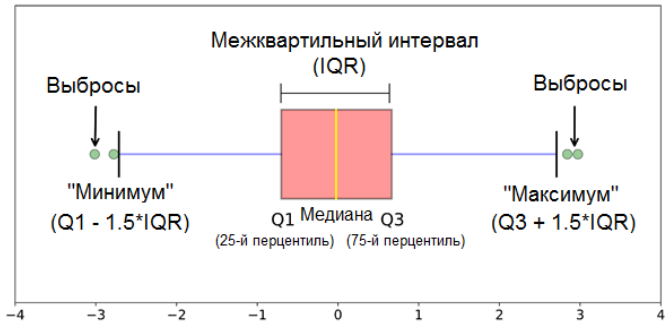


Рис. 1. Принцип работы IQR

После применения адаптивного порога создаем маску импульсов, сохраняем только импульсы и их позиции, чтобы в файле сохранялась информация о настоящем местоположении импульса после обработки, после чего происходит сохранение каждого файла в новом /mat файле, предварительно создаем для них папку для хранения. На примере одного из файлов получаем следующие графики на рис. 2 и 3.

Визуальный анализ показал в сравнении с изображением этого же файла до обработки, сделан вывод что алгоритм работает исправно.

Следующим шагом необходимо реализовать модели классификации [3] и подготовить файлы для работы.

Функция split_into_segments принимает 1D-сигнал (signal), размер сегмента (segment_size) и перекрытие (overlap). Вычисляет шаг между сегментами. Например, для segment_size=4096 и overlap=0.5 шаг будет 2048. Разбивает сигнал на сегменты с перекрытием:

```
Сегмент 0: signal[0:4096]
Сегмент 1: signal[2048:6144]
...
```

возвращает список сегментов.

Функция process_to_square принимает 1D-сегмент (например, 4096 точек) и целевой размер (target_size, например, 64×64). Преобразует сегмент в 2D-квадрат: size = sqrt(4096) = 64 → reshape(64, 64). Масштабирует до target_size с интерполяцией если размер не совпадает. Добавляет ось канала (для CNN): (64, 64) → (64, 64, 1).

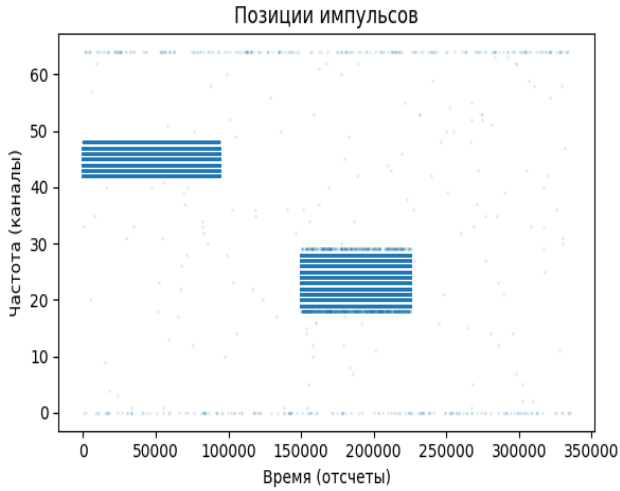


Рис. 2. Позиции импульсов на примере файла processed_s1q0.mat

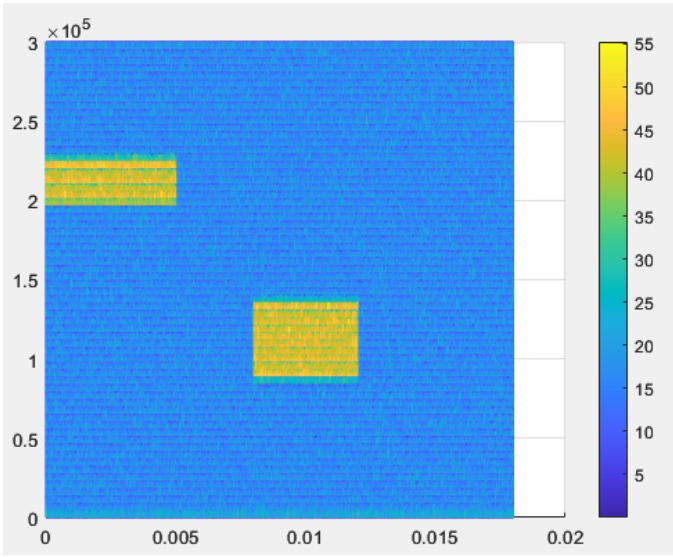


Рис. 3. Позиции импульсов на примере исходного файла s1q0.mat

Функция load_and_prepare_data — загрузка файлов. Для каждого класса (1-4) находит .mat-файлы в base_dir. Пропускает классы без файлов. Обработка файлов: Загружает данные из .mat-файла (ключ 'impulse_values'). Преобразует в 1D-массив (flatten()). Проверяет длину сигнала (должна быть ≥ SEGMENT_SIZE). Сегментация и преобразование: Разбивает сигнал на сегменты (split_into_segments). Каждый сегмент преобразует в 2D-изображение (process_to_square). Добавляет данные (X) и метки класса (y) в списки. Возвращает X: массив изображений (n_samples, 64, 64, 1) и y: массив меток (n_samples,).

Последним этапом программы было построение модели CNN, ниже предоставлена ее схема.

Исходя от вычислительных мощностей имеющегося для работы компьютера и целесообразности, решено выбрать 15 эпох для классификации и размер bath_size равным 32. Эпоха (epoch) — один полный проход всего набора данных через нейросеть для обучения. Batch size — количество примеров, которые обрабатываются за один шаг перед обновлением весов модели. Результаты работы программы представлены на рис. 4 и в таблице.

```
Итоговый размер данных: (14851, 64, 64, 1)
Model: "sequential"
_________________________________________________________________
 Layer (type)                Output Shape              Param #
=================================================================
 conv2d (Conv2D)             (None, 62, 62, 32)        320

 max_pooling2d (MaxPooling2D  (None, 31, 31, 32)       0
 )

 conv2d_1 (Conv2D)           (None, 29, 29, 64)        18496

 max_pooling2d_1 (MaxPooling  (None, 14, 14, 64)       0
 2D)

 conv2d_2 (Conv2D)           (None, 12, 12, 64)        36928

 flatten (Flatten)           (None, 9216)              0

 dense (Dense)               (None, 64)                589888

 dense_1 (Dense)             (None, 4)                 260

=================================================================
Total params: 645,892
Trainable params: 645,892
Non-trainable params: 0
```

Рис. 4. Схема созданной модели CNN

Информация о работе каждой эпохи

Epoch	loss	accuracy	val loss	val accuracy
1	1,4433	0,3597	1,3038	0,3588
2	1,3130	0,3878	1,2809	0,4039
3	1,2913	0,4057	1,2853	0,4083
4	1,2770	0,4225	1,2646	0,4524
5	1,2470	0,4497	1,2254	0,4615
6	1,2191	0,4602	1,2548	0,4308
7	1,1816	0,4865	1,1729	0,4944
8	1,1848	0,4802	1,1786	0,4894
9	1,1502	0,4966	1,1570	0,5005
10	1,1316	0,5053	1,1594	0,5157
11	1,1229	0,5106	1,2102	0,4837
12	1,1008	0,5206	1,1289	0,5025
13	1,0778	0,5338	1,1285	0,5150
14	1,0696	0,5332	1,1278	0,5362
15	1,0389	0,5430	1,1388	0,5332

Тестовая точность нейронной сети оказалась равной 0,5332, что является неплохим показателем для классификации пяти различных типов импульсов [4]. Несмотря на небольшое количество тестовых файлов для выбранной модели, все равно отслеживаем изменения с каждой эпохой и возрастающий показатель accuracy, результат оказался удовлетворительным.

Список источников

[1] Деменков Н.П., Микрин Е.А. *Управление в технических системах.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 443–445.

[2] *Умная нормализация данных.* URL: https://habr.com/ru/articles/527334/?amp%3Butm_source=habrahabr&amp%3Butm_medium=rss (дата обращения 20.10.2025).

[3] Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. *Глубокое обучение.* Москва, ДМК Пресс, 2018, 652 с.

[4] Рашка С. *Python и машинное обучение: крайне необходимое пособие по новейшей предсказательной аналитике, обязательное для более глубокого понимания методологии машинного обучения.* Москва, ДМК Пресс, 2017, 418 с.

The application of the least squares method for the analisys of the apartment market in Kaluga

Gudilin Ilya Pavlovich gudilinip@student.bmstu.ru
Korlyakova Maria Olegovna korlyakova@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This paper examines the implementation of an algorithm for classifying products based on a brightness-frequency-time radiation pattern based on a convolutional neural network using the Python programming environment. The operating principles of the convolutional neural network were studied, and a program for classifying test files of brightness-frequency-time radiation patterns using the CNN-based algorithm was developed. The aim of this paper is to study a classification algorithm based on a convolutional neural network and develop a program for analyzing the data selected for this task.

Keywords: *convolutional neural networks, CNN, data processing, data analysis*

УДК 621.391

Фильтрация синусно-косинусных сигналов в задаче вычисления угла поворота рулевого колеса

Провоторов Тимофей Васильевич provotorovtv@student.bmstu.ru
Финошин Александр Викторович finoshin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен метод обработки сигналов датчика угла поворота рулевого колеса, основанный на сочетании экспоненциального сглаживания и фильтрации с применением двумерного фильтра Калмана. Предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность вычисления угла при наличии шумов, фазовых сдвигов и нестабильности амплитуды сигналов. Разработанный подход демонстрирует погрешность не более ±5° при минимальной задержке обработки и может быть реализован на микроконтроллерах без значительных вычислительных затрат. Практическая значимость работы заключается в повышении надежности и точности систем рулевого управления, а также в возможности внедрения метода в современные автомобильные электронные блоки управления.

Ключевые слова: *фильтр Калмана, экспоненциальное сглаживание, обработка сигналов, датчик угла поворота рулевого колеса*

Датчик угла поворота рулевого колеса — ключевой элемент современных автомобильных систем, измеряющий положение руля и передающий данные в ЭБУ по протоколу SAE J1939 через CAN-шину [1]. Получаемая информация используется в системах активной безопасности, электроусилителе руля, адаптивном освещении и других подсистемах.

Для формирования углового значения применяются сигналы двух датчиков, подверженные шумам и искажениям вследствие нелинейности сенсоров, фазовых рассогласований, амплитудной нестабильности и электромагнитных наводок [2].

Для подавления помех используются фильтры низких частот, скользящее среднее и экспоненциальное сглаживание (EMA) [3–5]. Эти методы снижают шум, но вызывают задержку и фазовые искажения. Более точную коррекцию обеспечивает фильтр Калмана, требующий точной модели и настройки параметров [6].

В работе предложен комбинированный метод обработки сигналов. Он обеспечивает высокую точность (до ±5°), устойчивость к шумам, низкую вычислительную сложность и работу в реальном времени, что соответствует требованиям современных автомобильных систем.

На выходе формируются две пары сигналов — синусные и косинусные, несущие информацию об угловом положении рулевого колеса. Угол поворота вычисляется по формуле

$$\Phi = (\Phi 1 - \Phi 2)К, \qquad (1)$$

где Ф — угол поворота рулевой колонки; Ф1 и Ф2 — углы поворота большой и малой шестерен; К— коэффициент:

$$K = \frac{Z_1 Z_2}{Z(Z_1 - Z_2)} \approx 17{,}334, \quad (2)$$

где Z_1= 54; Z_2= 52; Z = 81 — числа зубьев шестерен.

В методике вводится эталонный сигнал — синтетический пилообразный сигнал, отражающий идеальное изменение угла рулевого колеса и используемый для оценки точности вычисленного угла.

Задача алгоритма — обеспечить вычисление угла *Ф*расч, который с минимальной погрешностью и задержкой совпадает с эталонным углом *Ф*эт:

$$\|\Phi\text{расч}(t) - \Phi\text{эт}(t)\| \le 5°, \Delta t_{max} = \max_t \left(t_{\text{расч}} - t_{\text{эт}}\right) \le 6 \text{ мс},$$

где Δt_{max} — временная задержка отклика алгоритма.

При использовании формулы (2) наблюдались значительные ошибки из-за фазовых и амплитудных искажений сигналов (рис. 2).

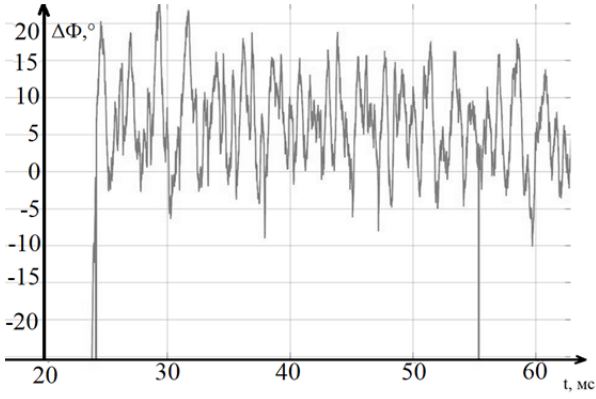


Рис. 2. Разность эталонного *Ф*эт и рассчитанного *Ф*расч сигналов угла поворота рулевого колеса до фильтрации

График показывает ошибку между эталонным сигналом и углом, вычисленным по необработанным данным. Наблюдаются колебания и отклонения до ±20° из-за шумов, фазовых искажений и нестабильности амплитуды.

Исходные данные:

$$\mathbf{x}_k = \{\sin1, \cos1, \sin2, \cos2\},$$

где k — номер отсчета. Сигналы зашумлены и содержат выбросы, поэтому предлагается трехэтапная обработка. Для демонстрации рассмотрим один датчик:

$$\mathbf{x}_k = \{\sin1, \cos1\}.$$

Этап 1. Предварительная фильтрация сигналов. На первом этапе выполняется фильтрация с помощью экспоненциального скользящего среднего (EMA) и ФНЧ [7]. Для каждого канала вычисляется:

$$\mathbf{y}_k = \beta \mathbf{x}_k + (1 - \beta)\mathbf{x}_{k-1}, \beta \in (0,1),$$

где $\mathbf{y}_k$— фильтрованное значение; β — коэффициент сглаживания, выбранный экспериментально для оптимального баланса между скоростью отклика и подавлением шумов.

Для исключения выбросов применяется пороговое условие:

$$\|\mathbf{x}_k - \mathbf{y}_k\| < \delta,$$

где $\mathbf{x}_k$ — исходное измерение; $\mathbf{y}_k$ — фильтрованное значение; δ — порог допустимого отклонения.

Если отклонение превышает δ, $\mathbf{x}_k$ заменяется предыдущим фильтрованным значением $\mathbf{y}_{k-1}$, предотвращая влияние всплесков. Для учета направления вращения применяется пороговый детектор [8]:

$$d_k = \begin{cases} 1, \Delta_k > \varepsilon; \\ 0, \Delta_k < -\varepsilon; \\ d_{k-1}, |\Delta_k| \leq \varepsilon, \end{cases}$$

где ε = 10^{-4} — порог чувствительности, d_k используется для синхронизации фаз синусного и косинусного каналов.

Этап 2. Усреднение и стабилизация сигнала. Для снижения влияния колебаний амплитуды применяется скользящее усреднение длиной $N = 6$ [9]:

$$\bar{\mathbf{x}}_k = \frac{1}{N}\sum_{i=k-N+1}^{k} \mathbf{x}_i.$$

Этап 3. Фильтрация синусно-косинусных сигналов. Пусть состояние системы в момент времени k описывается вектором [10]:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_k) \\ \cos(\varphi_k) \end{bmatrix},$$

где $\sin(\varphi_k)$ и $\cos(\varphi_k)$ — оценки синусной и косинусной составляющих сигнала первого датчика.

Для каждого датчика вычисляется амплитуда:

$$A = \sqrt{(\sin(\varphi_k))^2 + (\cos(\varphi_k))^2}.$$

Нормализованные сигналы:

$$sin^{(n)} = \frac{\sin(\varphi_k)}{A}, cos^{(n)} = \frac{\sin(\varphi_k)}{A}.$$

Нормализованные значения формируют вектор измерений:

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} \sin^{(n)} \\ \cos^{(n)} \end{bmatrix}.$$

Ковариационная матрица состояния:

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\sin sin} & \boldsymbol{P}_{\sin cos} \\ \boldsymbol{P}_{\cos sin} & \boldsymbol{P}_{\cos cos} \end{bmatrix}_k$$

отражает неопределенность компонентов и их корреляцию.

Параметры модели:

$$\mathbf{A} = \mathbf{E}_2, \mathbf{Q} = \boldsymbol{q}\mathbf{E}_2, \mathbf{R} = \boldsymbol{r}\mathbf{E}_2, \mathbf{H} = \mathbf{E}_2,$$

где A — матрица перехода состояния; Q — ковариация шума процесса процесса ($\boldsymbol{q}$ = 0.00085); R — ковариация шума измерений ($\boldsymbol{r}$ = 0.005); H — матрица наблюдений; $\mathbf{E}_2$— единичная матрица размерности 2×2.

Этап предсказания:

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{A}^{\mathbf{T}} + \mathbf{Q},$$

где $\mathbf{x}_{k|k-1}$ — предсказанное состояние на шаге k; $\mathbf{P}_{k|k-1}$ — предсказанная ковариация состояния.

Инновация:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}_{k|k-1}, \mathbf{S}_k = \mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^{\mathbf{T}} + \mathbf{R}.$$

Коэффициент Калмана и обновление:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^{\mathbf{T}}\mathbf{S}_k{}^{-1}, \mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k\mathbf{y}_k, \mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{E}_2 - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k|k} - 1.$$

На графиках (рис. 3–5) показаны рассчитанный угол и эталонный сигнал. В исходной модели ошибки достигали ±20° и задержки до 12 мс. После применения фильтра Калмана ошибка снизилась до ±5°, а время обработки — до 5 мс.

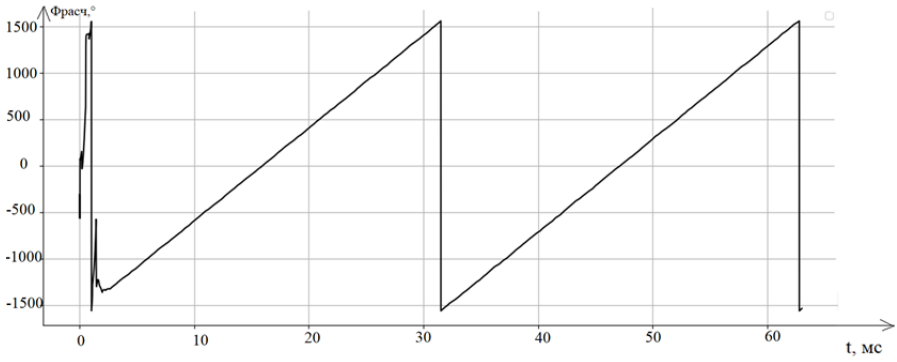


Рис. 3. Расчетный угол после применения фильтрации

Проведенный анализ показал, что разработанный алгоритм обеспечивает высокую точность и устойчивость вычисления угла поворота рулевого колеса при минимальных временных задержках, что делает его пригодным для при-

менения в системах реального времени. Разработанный метод был протестирован и рекомендован к внедрению в Инжиниринговом центре им. А.А. Липгарта (Группа ГАЗ) при реализации систем измерения угла поворота рулевого колеса.

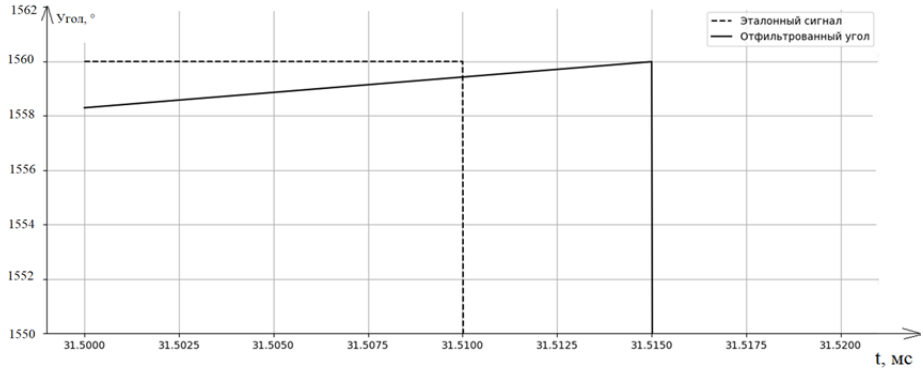


Рис. 4. Временная задержка с эталонным сигналом

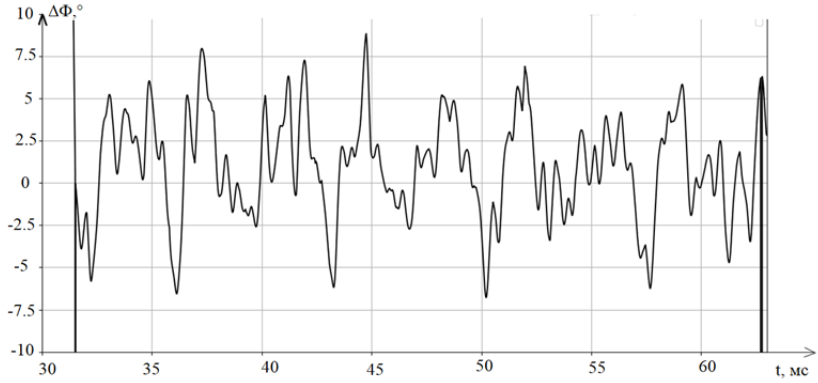


Рис. 5. Разность эталонного и рассчитанного сигналов угла поворота рулевого колеса после фильтрации

Список источников

[1] Romanova N.V. *Steering angle sensors: design, operating principles, and applications.* Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2012, 180 p.

[2] Egorov Y.G., Popov E.A. Scalar calibration of a vector meter: error analysis. *Gyroscopy and navigation*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 17–26. https://doi.org/10.1134/S2075108721010053

[3] Chukhraev I.V., Drach V.E. Parameter optimization of broadband interference-suppressing filters of hi-performance power supplies. *Proceedings of the 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering,* 2023. https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086788

[4] Ivanyuk V., Tsvirkun A., Sunchalina A. Overview of modern forecasting methods and models. *Proceedings of 2023 16th International Conference Management of Large-Scale System Development*, 2023. https://doi.org/10.1109/MLSD58227.2023.10303912

[5] Lifei Z., Qiaotsu H., Neusypin K.A. Methods for Correcting Inertial Navigation Systems. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2549, no. 1. https://doi.org/10.1063/5.0111120

[6] Neusypin K.A., Selezneva M.S., Huong T.N. Correction of autonomous navigation systems using the Kalman filter. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171. https://doi.org/10.1063/1.5133357

[7] Chukhraev I.V., Drach V.E. Parameter Optimization of Broadband Interference-Suppressing Filters of Hi-Performance Power Supplies. *Proceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*, 2023. https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086788

[8] Goryainov V.B., Goryainova E.R. Comparative analysis of robust and classical methods for estimating the parameters of a threshold autoregression equation. *Automation and remote control*, 2019, vol. 80, no. 4, pp. 666–675. https://doi.org/10.1134/S0005117919040052

[9] Goryainov V.B., Goryainova E.R. Sign test for hypothesis about the order of equation in moving average model. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2016, vol. 6, pp. 4–15. https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-6-4-15

[10] Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletarsky A.V. Navigation complex with adaptive non-linear kalman filter for unmanned flight vehicle. *Metrology and measurement systems*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 541–550. https://doi.org/10.24425/mms.2019.129580

Filtering of sine-cosine signals in the task of steering wheel angle calculation

Provotorov Timofey Vasilyevich provotorovtv@student.bmstu.ru
Finoshin Alexander Viktorovich finoshin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This paper presents an improved method for processing steering wheel angle sensor signals based on a combination of exponential smoothing and filtering using a two-dimensional Kalman filter. The proposed algorithm provides high accuracy of angle estimation even in the presence of noise, phase shifts, and amplitude instability. MATLAB and Python tools were used for implementation, enabling real-time filtering, normalization, and visualization of results. The developed approach demonstrates an error of no more than ±5° with minimal processing delay and can be implemented on microcontrollers without significant computational overhead. The practical significance of this work lies in improving the reliability and accuracy of steering control systems, as well as in the potential integration of the proposed method into modern automotive electronic control units.

Keywords: *Kalman filter, exponential smoothing, signal processing, steering wheel angle sensor*

УДК 681.5.015.23

Исследование алгоритма синтеза робастных регуляторов систем управления

Варданян Тигран Артурович vardanyantiko2003@mail.ru
Корнюшин Юрий Петрович kornyushin.yup@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен возможный алгоритм синтеза робастных регуляторов для нелинейных систем управления с параметрически неопределенным объектом управления. Проведено исследование алгоритма синтеза робастного регулятора на тестовом примере. Проведены результаты синтеза. Найдены оптимальные значения параметров регулятора. Определена вероятность «качественной» работы регулятора для всего семейства рассматриваемых объектов. Поскольку вероятность «качественной» работы регулятора для всего семейства является достаточно большой, можно считать, что необходимое качество работы системы выполнено.

Ключевые слова: *робастное управление, нелинейная система управления, параметрическая неопределенность, робастный регулятор, динамическая система*

Введение. Ранее [1] была выполнена постановка задачи и рассмотрен возможный алгоритм синтеза робастных регуляторов для нелинейных систем управления с параметрически неопределенным объектом управления. Кратко остановимся на сущности предложенного алгоритма. Неопределенность параметров объекта управления рассматривается как проявление его стохастических свойств. Параметрически неопределенный объект можно рассматривать как семейство объектов со случайно заданными, но определенными параметрами [2–5]. Структура регуляторов (одного или нескольких) полагается заданной.

Алгоритм синтеза состоит из двух основных этапов. На первом этапе используется квадратичная целевая функция, которая минимизируется для каждого экземпляра объекта из заданного семейства, что позволяет получить набор оптимальных для каждого случая коэффициентов регулятора. На втором этапе производится агрегация полученных наборов параметров в единую систему управления. Этот процесс может основываться на различных принципах, таких как усреднение, выбор наихудшего случая или использование методов кластеризации для выделения доминирующих конфигураций.

Ключевым преимуществом подхода является его адаптивность к статистическому разбросу параметров, что в конечном итоге повышает надежность и предсказуемость поведения системы в реальных условиях эксплуатации, где точные значения параметров априори неизвестны. Таким образом, синтезированный регулятор демонстрирует устойчивость к вариациям в объекте управления.

Важно подчеркнуть, что предлагаемый двухэтапный метод позволяет декомпозировать сложную задачу робастного синтеза на две более простые и последовательно решаемые подзадачи. Это не только снижает вычислительную сложность, но и предоставляет проектировщику содержательную информацию о влиянии разброса параметров на качество управления. Данная информация может быть использована для дальнейшего уточнения требований к системе или для проведения целенаправленного доопределения параметров объекта, что открывает путь для итеративного улучшения регулятора.

$$J = \int_0^T \left(x_{вi}\left(t, \mathbf{P}_i, v_i\right) - x_э(t) \right)^2 dt, \qquad (1)$$

где $x_{вi}\left(t, \mathbf{P}_i, v_i\right)$ — выход i-й системы (регулятор и объект управления); $x_э(t)$ — эталонный выходной сигнал; $\mathbf{P}_i$ — вектор искомых параметров регулятора(ов); v_i — случайные значения параметров i-го объекта управления.

Минимизация, которой позволяет определить возможные границы изменения оптимальных параметров регуляторов, для всего семейства систем.

На втором этапе используется целевая функция, учитывающая интервальную неопределенность эталонного сигнала.

$$J = \int_0^T \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[sign\left(x_{вi}\left(t_j, \mathbf{P}, v_i\right) - \underline{x}_э(t) \right) \cdot sign\left(\overline{x}_э(t) - x_{вi}\left(t_j, \mathbf{P}, v_i\right) \right) \right] dt. \qquad (2)$$

Максимизация данного критерия выполняется при учете ограничений, полученных при минимизации целевой функции (1). Максимальное значение критерии обеспечивают оптимальные значения параметров регулятора $\mathbf{P}^*$ для всего семейства систем.

Исследование алгоритма синтеза. Исследование поведем на тестовом примере.

Пример. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

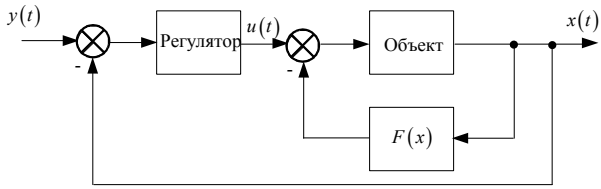


Рис. 1. Структурная схема системы

Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W(s) = \frac{0.5}{0.5s^2 + 0.5s + 1}.$$

Эталонная функция $x_э(t) = 1 - e^{-t}$.

Нелинейная характеристика цепи обратной связи имеет вид $F(x) = x^2$.

Коэффициент передачи объекта управления $K = 1$. Постоянные времени объекта управления могут изменяться в интервале $0.5 \le T_1 \le 1;\ \ 0.5 \le T_2 \le 1$. При изменении постоянных времени T_1, T_2, система может быть как устойчивой, так и неустойчивой.

Для обеспечения требуемого качества управления в систему вводится регулятор, имеющий передаточную функцию:

$W_{ky}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$, ПИД-регулятор

где K_p, K_i, K_d — неизвестные параметры регулятора.

В качестве задающего входного воздействия выберем единичную ступенчатую функцию $y(t) = 1(t)$.

В качестве эталонного сигнала выбираем: $x_Э(t) = 1 - e^{-\alpha t}$, $\alpha = 2$. $\overline{x}_э(t) = 1{,}1 \cdot 1(t) - 0{,}05 \cdot 1(t - t_p)$ $\underline{x}_э(t) = 0{,}95 \cdot 1(t - t_p)$, $t_p = 2.5$.

Результат синтеза. Положим, число случайно выбранных объектов управления N =100. Минимизация целевой функции (1) дает следующие границы изменения параметров:

$$5.1600 < K_p < 20.0028$$
$$0.9305 < K_u < 4.1573$$
$$10.2437 < K_д < 35.9650.$$

На рис. 2 показано 100 выходных функций, являющихся реакциями системы на единичное ступенчатое воздействие.

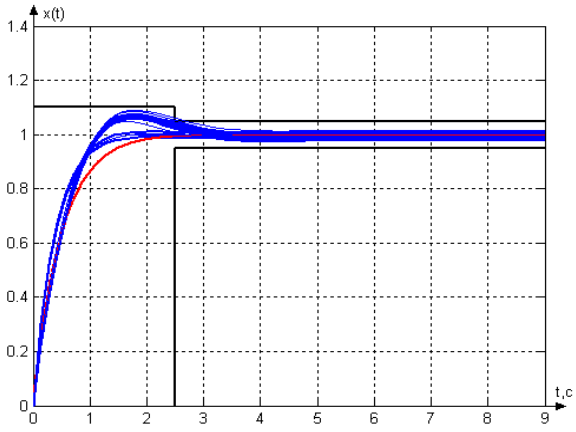


Рис. 2. Эталонная и реальная переходная функция скорректированной системы

Как видно из рис. 2 некоторые реализации системы не находятся в «коробочке» В.В. Солодовникова.

Максимизация целевой функции (2) дает следующие значения параметров регулятора:

$$K_p^* = 8{,}3860; \quad K_u^* = 2{,}7587; \quad K_\partial^* = 12{,}2780.$$

На рис. 3 показано 15 выходных функций, когда регулятор принимает значение $P^* = (K_p^*, K_u^*, K_\partial^*)$ и система принимает разные значения T_1, T_2.

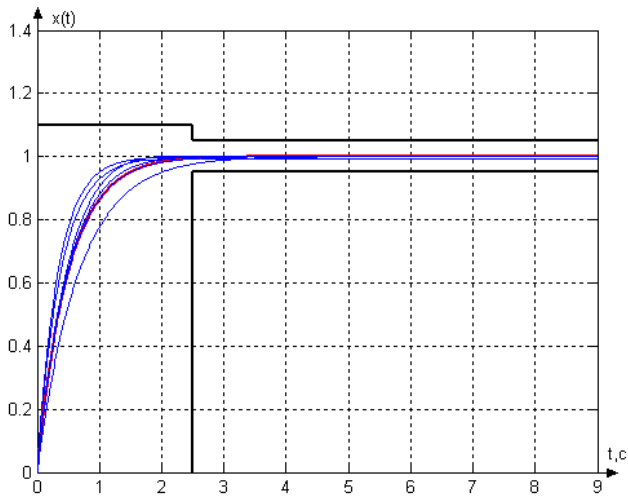


Рис. 3. Эталонная и реальная переходная функция системы с значениями $P^* = (K_p^*, K_u^*, K_\partial^*)$ и разными значениями T_1, T_2

Заключение. Вероятность «качественной» работы регулятора для всего семейства рассматриваемых объектов составляет величину

$$P\left(\underline{x}_э(t) \le x_{вi}\left(t, \mathbf{P}^*, v_i\right) \le \overline{x}_э(t)\right) = 0.9513.$$

Так как вероятность «качественной» работы регулятора для всего семейства является достаточно большой, можно считать, что необходимое качество работы системы выполнено.

Список источников

[1] Корнюшин Ю.П., Варданян Т.А. Постановка задачи и возможный алгоритм синтеза робастных регуляторов для нелинейных систем управления. *Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Региональная НТК: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025.

[2] Поляк Б.Т., Щербаков П.С. *Робастная устойчивость и управление.* Москва, Наука, 2002, 273 с.

[3] Корнюшин Ю.П. Синтез робастных регуляторов для нелинейных следящих систем. *Наукоемкие технологии*, 2020, т. 21, № 6, с. 63–69. https://doi.org/10.18127//j19998465-202006-10

[4] *Robust Control Design: An Optimal Control Approach.* URL: http://www.ece.eng.wayne.edu/flin (accessed 17.10.2025).

[5] Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Серия: Естественные науки, 2014, № 1, с. 78–93.

Development of an automated workstation for calibrating electro-radio measuring instruments

Vardanyan Tigran Arturovich vardanyantiko2003@mail.ru
Kornyushin Yuriy Petrovich kornyushin.yup@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A possible algorithm for the synthesis of robust controllers for nonlinear control systems with a parametrically uncertain control object is considered. A study of the robust controller synthesis algorithm is conducted using a test example. The results of the synthesis are presented. The optimal values of the controller parameters are found. The probability of the controller's "good" performance for the entire family of objects under consideration is determined. Since the probability of the controller's "good" performance for the entire family is sufficiently high, it can be assumed that the required system performance is achieved.

Keywords: *robust control, nonlinear control system, parametric uncertainty, robust controller, dynamic system*

УДК 004.896

Подход к автоматизации подготовки мультимодальных материалов для RAG - моделей

Никитин Максим Вячеславович[1] mnikitin1@yandex.ru
Корлякова Мария Олеговна[2] mkorlyakova@bmstu.ru

[1] *КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия*
[2] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

Рассмотрена задача автоматизации подготовки и обработки мультимодальных документов для использования в системах типа Retrieval Augmented Generation (RAG). Предложена модель автоматизированного конвейера, включающая этапы сбора, сегментации, векторизации и индексации разнородных данных. Описаны методы интеграции мультимодальных эмбеддингов и обеспечения согласованности контекста. Проведен анализ существующих решений и выявлены ключевые проблемы, такие как синхронизация модальностей и обеспечение релевантности извлекаемых фрагментов. Разработанный подход позволяет повысить качество и скорость подготовки данных для RAG-систем

Ключевые слова: *Retrieval Augmented Generation (RAG), мультимодальные данные, автоматизация подготовки данных, векторизация, семантический поиск, обработка естественного языка, компьютерное зрение*

Retrieval Augmented Generation (RAG) зарекомендовал себя как эффективный подход для задач генерации ответов в обработке естественного языка (NLP) [1]. Однако традиционные RAG-системы в основном ориентированы на текстовые данные. В современных условиях информация представлена в разнообразных форматах: текстовые документы, изображения, схемы, таблицы, аудио- и видеозаписи. Такие совокупности данных получили название мультимодальных. Использование мультимодальных документов в RAG открывает новые возможности для создания более точных, информативных и контекстуально насыщенных ответов, но одновременно порождает комплекс проблем, связанных с их подготовкой и обработкой. Основная проблема заключается в отсутствии стандартизированных и автоматизированных методов предобработки, индексации и совместного использования разнородных данных в рамках единой RAG-архитектуры. Процесс подготовки мультимодальных материалов для RAG-моделей часто требует значительных ручных усилий, что замедляет развертывание систем и повышает вероятность ошибок.

RAG-архитектура состоит из двух основных этапов: извлечения и генерации [2]. На этапе извлечения система находит в базе знаний релевантные фрагменты информации, которые затем используются языковой моделью для генерации ответа. Если база знаний состоит исключительно из текста, для извлечения применяются хорошо изученные методы семантического поиска на основе текстовых эмбеддингов [3].

Однако при переходе к мультимодальным данным возникают следующие проблемы.

Гетерогенность форматов: данные требуют различных подходов к обработке (NLP для текста, компьютерное зрение для изображений).

Семантическая связность: необходимость сохранения смысловых связей между элементами разных модальностей (например, между изображением и его текстовым описанием).

Эффективность поиска: задача поиска релевантных фрагментов усложняется, так как необходимо искать не только по тексту, но и по другим модальностям и их комбинациям.

Масштабируемость: ручная подготовка и разметка мультимодальных корпусов трудоемка и плохо масштабируется.

Таким образом, актуальной задачей является создание автоматизированного конвейера, который бы решал эти проблемы, обеспечивая единообразную и эффективную подготовку мультимодальных материалов для RAG.

Существующие подходы к обработке мультимодальных данных. В области обработки мультимодальных данных можно выделить несколько ключевых направлений.

Мультимодальные эмбеддинги: разработаны модели, способные преобразовывать данные разных типов в единое векторное пространство. Примером являются модели типа CLIP [4], которые обучаются на парах «изображение-текст» и позволяют находить семантически близкие элементы из разных модальностей. Аналогичные подходы развиваются для видео, аудио и других типов данных.

Мультимодальные векторные базы данных: появились специализированные базы данных, такие как Qdrant, Weaviate или Milvus, которые поддерживают хранение и эффективный поиск по мультимодальным эмбеддингам [5].

Фреймворки для RAG: такие инструменты, как LangChain и LlamaIndex, начинают добавлять экспериментальную поддержку мультимодальных RAG-конвейеров [6]. Они предоставляют абстракции для загрузки документов разных типов, их чанкинга (сегментации) и последующего поиска.

Несмотря на эти достижения, большинство существующих решений носят фрагментарный характер и требуют глубокой технической экспертизы для интеграции в единую рабочую систему. Отсутствует готовый, автоматизированный конвейер «под ключ».

Предлагаемая модель автоматизированного конвейера. Предлагается архитектура автоматизированного конвейера для подготовки мультимодальных материалов, состоящая из следующих последовательных этапов.

1. Сбор и унификация данных (Data Ingestion & Unification). На этом этапе система принимает на вход разнородные данные: PDF-документы (с текстом и изображениями), презентации PPTX, HTML-страницы, наборы изображений (JPG, PNG), CSV-таблицы и т. д. Используются специализированные загрузчики (на базе, например, библиотеки unstructured [7]) для из-

влечения контента и его метаданных. Все данные приводятся к унифицированному внутреннему представлению — набору объектов «узел» (Node), где каждый узел содержит контент, тип модальности и метаинформацию (источник, страница и пр.).

2. Сегментация и чанкинг (Segmentation & Chunking). Для эффективного поиска большие документы необходимо разбивать на семантически целостные фрагменты (чанки). Для текста применяются стратегии чанкинга по предложениям или абзацам с учетом перекрытия (overlap). Для изображений чанком может являться отдельное изображение или логическая группа изображений. Ключевая задача этапа — обеспечить сохранение контекстных связей между чанками разных модальностей. Например, изображение и его подпись должны быть обработаны как связанный мультимодальный чанк.

3. Векторизация (Vectorization). Каждый чанк преобразуется в числовой вектор (эмбеддинг). Для этого используются претренированные модели:

– Текст: текстовые модели типа sentence-transformers (all-MiniLM-L6-v2);

– **Изображения:** визуальные модели типа ResNet или, что предпочтительнее для поиска, мультимодальные модели типа CLIP, которые создают эмбеддинги, семантически согласованные с текстовыми описаниями.

4. Индексация и хранение (Indexing & Storage). Полученные векторы вместе с исходными чанками (метаданные + исходный контент) сохраняются в мультимодальной векторной базе данных (например, Qdrant). В базе данных создаются отдельные коллекции (или используются гибридные индексы) для векторов разных типов, но с возможностью выполнения совместных запросов.

5. Интеграция с RAG (RAG Integration). На этапе инференса (получения ответа) пользовательский запрос (который также может быть мультимодальным, например «найди схему, похожую на эту картинку, и объясни ее») обрабатывается аналогично: векторизуется, и в векторной базе выполняется поиск *k*-ближайших соседей (*k*-NN) по всем модальностям. Найденные мультимодальные чанки объединяются в единый контекст и передаются на вход крупной языковой модели (LLM) для генерации финального ответа.

Преимущества и ограничения предлагаемого подхода.

Преимущества:

– автоматизация: значительное сокращение ручного труда на подготовку данных;

– полнота контекста: генерация ответов на основе более богатого и разнообразного контекста;

– повышение точности: возможность находить и использовать информацию, недоступную при работе только с текстом;

– масштабируемость: конвейер легко адаптируется для обработки новых типов данных и увеличения объемов информации.

Ограничения и вызовы:

– вычислительная сложность: векторизация и поиск по мультимодальным данным требуют значительных вычислительных ресурсов;

– качество моделей: эффективность всей системы критически зависит от качества используемых моделей для векторизации (CLIP и т. п.);

– сложность оценки: отсутствие стандартизированных метрик для оценки качества мультимодального RAG;

– синхронизация модальностей: риск потери семантических связей между разными типами данных на этапах предобработки.

В заключение стоит отметить, что в данной работе предложена модель автоматизированного конвейера для подготовки мультимодальных материалов, предназначенных для использования в RAG-системах. Разработанная архитектура позволяет систематизировать и автоматизировать процессы сбора, сегментации, векторизации и индексации разнородных данных, решая ключевую проблему их интеграции в единое семантическое пространство.

Предложенный подход открывает новые возможности для создания более мощных и точных систем искусственного интеллекта, способных работать с реальной, гетерогенной информацией. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию вычислительных затрат, разработку более точных мультимодальных моделей и создание стандартизированных методик для оценки качества таких систем.

Список источников

[1] Lewis P., Perez E. *Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks.* URL: https://arxiv.org/abs/2005.11401 (accessed 01.06.2024).

[2] Guu K., Lee K. *Retrieval-Augmented Generation for Question Answering.* URL: https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/file/6b493230205f780e1bc26945df7481e5-Paper.pdf (accessed 01.06.2024).

[3] Reimers N., Gurevych I. *Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks.* URL: https://arxiv.org/abs/1908.10084 (accessed 01.06.2024).

[4] Radford A., Kim J.W. *Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision.* URL: https://arxiv.org/pdf/2103.00020 (accessed 01.06.2024).

[5] *Documentation Qdrant.* URL: https://qdrant.tech/documentation/ (accessed 01.06.2024).

[6] *Documentation LlamaIndex.* URL: https://docs.llamaindex.ai/ (accessed 01.06.2024).

[7] *The unstructured library.* URL: https://github.com/Unstructured-IO/unstructured (accessed 01.06.2024).

An approach to automating the preparation of multimodal materials for RAG models

Nikitin Maxim Vyacheslavovich[1] mnikitin1@yandex.ru
Korlyakova Maria Olegovna[2] mkorlyakova@bmstu.ru

[1] *Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia*
[2] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

The problem of automating the preparation and processing of multimodal documents for use in Retrieval Augmented Generation (RAG) systems is considered. An automated pipeline model is proposed that includes the stages of collection, segmentation, vectorization, and indexing of heterogeneous data. Methods for integrating multimodal embeddings and ensuring context consistency are described. An analysis of existing solutions has been carried out and key problems have been identified, such as synchronizing modalities and ensuring the relevance of extracted fragments. The developed approach makes it possible to improve the quality and speed of data preparation for RAG systems.

Keywords: *Retrieval Augmented Generation (RAG), multimodal data, automation of data preparation, vectorization, semantic search, natural language processing, computer vision*

УДК 681.5.015.23

Синтез дискретного алгоритма управления электроприводом с упругими связями

Семехин Дмитрий Евгеньевич sde19ki188@student.bmstu.ru
Акименко Дмитрий Андреевич akimenko_d_a@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача построения алгоритма управления скоростью вращения выходного звена электропривода с упругой передачей крутящего момента из условия обеспечения замкнутой системой управления требуемых показателей качества в переходном режиме. На основе непрерывного закона управления, построенного по принципу управления по ускорению, с использованием преобразования Тустена получен дискретный алгоритм, пригодный для реализации на микроконтроллере. Приведены результаты моделирования полученной замкнутой дискретно-непрерывной системы управления приводом с упругой передачей.

Ключевые слова: *алгоритм управления, дискретное управление, математическая модель, системы управления, объект управления, электропривод*

Доступность, высокая производительность и возможность реализации сложных алгоритмов управления обусловило широкое применение микроконтроллеров в системах управления, в частности управлении электроприводами, поскольку к ним предъявляются высокие требования по точности позиционирования и скоростным характеристикам [1].

В нагруженных приводах и приводах с конструктивными особенностями необходимо учитывать упругость механических передач, что вносит существенный вклад в динамику привода и, как следствие, усложняет модель управляемой системы. На рис. 1 представлена структурная схема электропривода с упругой передачей крутящего момента, а на рис. 2 изменение скорости вращения выходного звена при подаче на вход номинального напряжения.

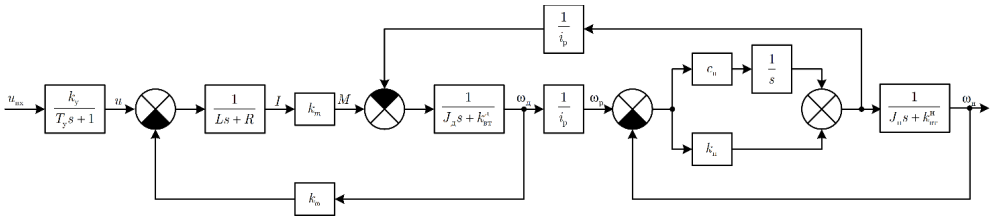


Рис. 1. Структурная схема объекта

Синтез дискретного алгоритма управления электропривода. Одним из вариантов решения задачи синтеза алгоритмов управления такими объек-

тами является подход, в основе которого лежит принцип управления по ускорению [2]. Управляемая система представляется в виде соединения ведомой (упругой) и ведущей подсистем. Из условия реализации назначаемой траектории движения ведомой подсистемы определяется требуемая траектория движения ведущей, а затем синтезируется управление, при котором осуществляются эти движения [3].

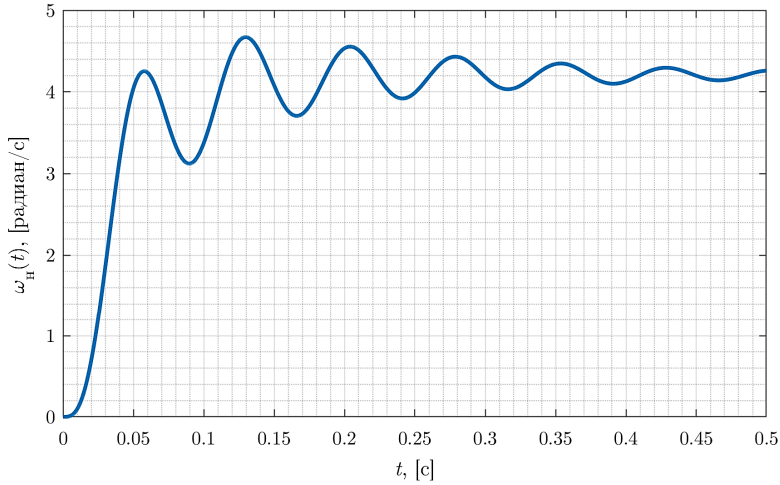


Рис. 2. График изменения скорости вращения выходного звена

Задачу синтеза управления формулируется следующим образом: необходимо найти закон управления $u = u(\omega, \dot{\omega})$, обеспечивающий переход из некоторого начального состояния $\omega(0) = \omega_0$, $\dot{\omega}(0) = \dot{\omega}_0$ к заданному установившемуся режиму $\omega(\infty) = \omega^0$, $\dot{\omega}(\infty) = 0$ и при этом переходный процесс $\omega(t) \to \omega^0$ должен с требуемой точностью следовать решению эталонного дифференциального уравнения:

$$\ddot{\omega}^* + \alpha_1\dot{\omega}^* + \alpha_0\omega^* = \alpha_0\omega^0,\ \alpha_0,\ \alpha_1 = \text{const} > 0;$$

$$\omega^*(0) = \omega_0, \dot{\omega}^*(0) = \dot{\omega}_0.$$

Здесь коэффициенты α_0, α_1 определяют желаемый характер переходного процесса.

В результате решения поставленной задачи находится управляющая функция (напряжение на входе электропривода) в виде выражения

$$\ddot{u}(t) + k_0\dot{u}(t) = k_0\ddot{\delta}(t) + k_1\dot{\delta}(t) + k_2\delta(t),$$

где $\delta(t) = \omega^*(t) - \omega(t)$, эталонный процесс $\omega^*(t)$ определяется выражением

$$\omega^*(t) = \int_0^t \left[\alpha_0 \int_0^t (\omega^0 - \omega)dt - \alpha_1\omega\right] dt.$$

Коэффициенты k_0, k_1, k_2 определяется из условия обеспечения требуемой точности совпадения реальной траектории с траекторией эталонной модели.

На рис. 3 представлена структурная схема замкнутой непрерывной системы управления электроприводом с упругой передачей крутящего момент.

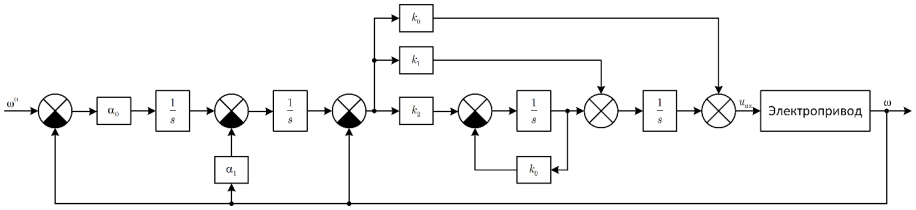
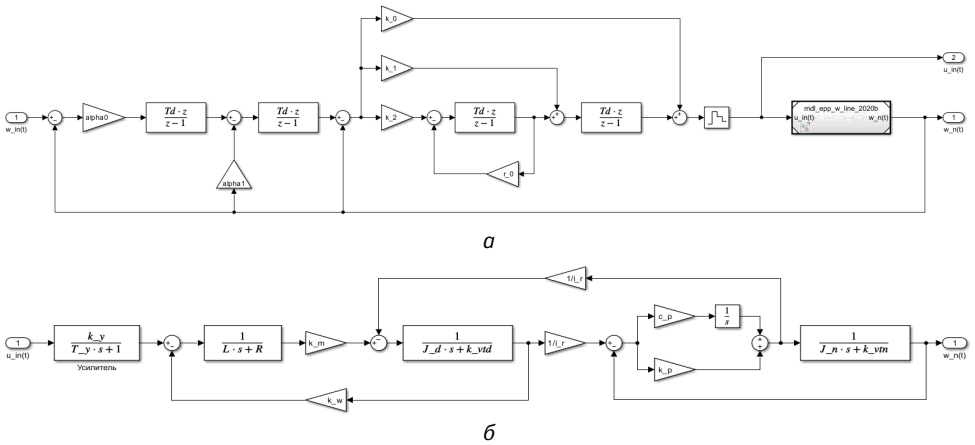


Рис. 3. Структурная схема замкнутой непрерывной системы управления

Переход к дискретному алгоритму управления можно выполнить воспользовавшись преобразование Тустена или обратным методом Эйлера [4]. Это позволит получить разностные уравнения, которые пригодны для программной реализации на конкретном микроконтроллере, и при этом сохраняются основные динамические свойства исходной непрерывной системы.

Результаты моделирования. На рис. 4 представлена структурная схема дискретно-непрерывной системы управления электроприводом, реализованная в среде математической моделирования динамических систем.



а

б

Рис. 4. Структурная схема дискретно-непрерывной системы управления:
а — замкнутой системы; *б* — электропривода

На рис. 5 представлены графики выходной координаты — скорости вращения выходного звена электропривода — полученной замкнутой дискретно-непрерывной системы управления и для сравнения эталонной модели. На

рис. 6 представлен график управляющего напряжения на входе электропривода.

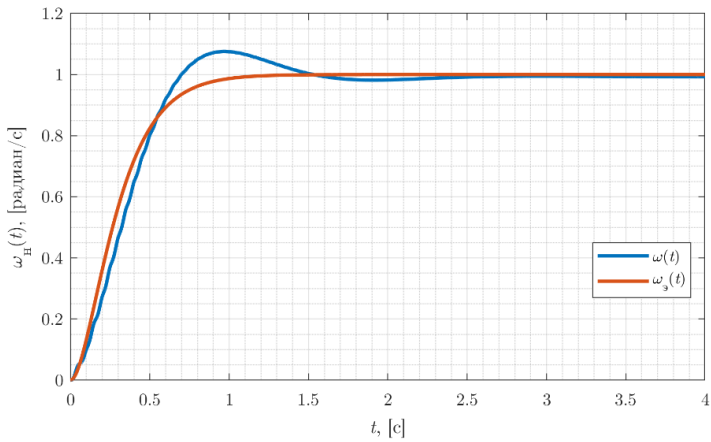


Рис. 5. Графики скорости вращения замкнутой системы управления и эталонной модели

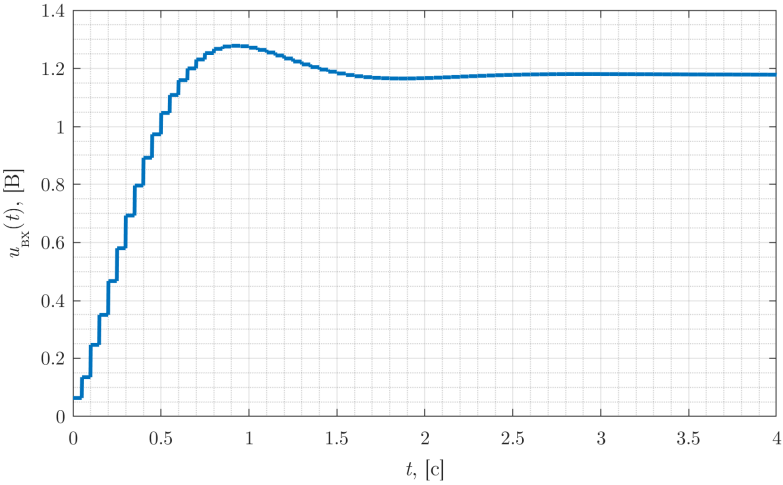


Рис. 6. График управляющего напряжения

Таким образом, рассмотренный выше подход позволил синтезировать дискретный алгоритм управления электроприводом с упругой передачей крутящего момента, который позволил компенсировать влияние упругой передачи [5] и обеспечить показатели качества в переходном режиме с требуемой точностью, что демонстрируется соответствующими результатами моделирования. Дальнейшим направлением исследования будет заключатся в исследовании полученного алгоритма с точки зрения адаптивности.

Список источников

[1] Федоров С.Ф., Федорова О.С. *Синтез систем управления с применением цифровых регуляторов.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 255 с.

[2] Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического управления.* Санкт-Петербург, Профессия, 2004, 752 с.

[3] Мирошник И.В. *Теория автоматического управления*. *Нелинейные и оптимальные системы.* Санкт-Петербург, Питер, 2006, 272 с.

[4] Astrom K.J., Wittenmark B. *Computer-controlled systems: theory and design*. Dover Publications, 2011, 557 p.

[5] Анисимов О.С., Куропатенко В.Ф., Титов В.Г. Управление электромеханическими системами с упругими связями. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2005, № 6, с. 120–128.

Synthesis of a discrete control algorithm for an electric drive with elastic connections

Semekhin Dmitry Evgenievich sde19ki188@student.bmstu.ru
Akimenko Dmitry Andreevich akimenko_d_a@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of constructing an algorithm for controlling the speed of rotation of the output link of an electric drive with elastic torque transmission from the condition of providing a closed control system with the required quality indicators in a transient mode is considered. Based on the obtained continuous algorithm, discrete control is built. The simulation results of the resulting closed discrete-continuous control system for an elastic transmission drive are presented.

Keywords: *control algorithm, discrete control, mathematical model, control systems, control object, electric drive*

УДК 681.5.015.23

Постановка задачи синтеза следящего регулятора для стабилизации угловой скорости турбины. Проверка управляемости объекта

Шиленков Илья Дмитриевич crazyadventures51@gmail.com
Корнюшин Юрий Петрович theroland@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Предложено для управления таким объектом, как турбина, использовать регуляторы, работающие не в режиме стабилизации, который не всегда является управляемым по времени перевода объекта в заданное состояние, а регуляторы, обеспечивающие режим слежения выходных координат управляемого объекта за требуемой траекторией их изменения. Выполнена проверка управляемости объекта (турбины), который относится к классу нелинейным аффинным системам. Показано, что объект является полностью управляемым, а также согласно принципу двойственности является также полностью наблюдаемым, тем самым подтверждена возможность использования следящих регуляторов для управления турбинами.

Ключевые слова: *турбина, регуляторы, слежение, нелинейные, управляемость, аффинные системе*

Важнейшим фактором, определяющим эффективность современной энергетики, является надежность функционирования энергетического оборудования. Среди многих элементов, определяющих безотказность и долговечность энергетической турбины, отводится системам регулирования. Исполнительная часть системы регулирования энергетических турбин является достаточно сложной [1], включает большое число сервоприводов гидравлического типа, обеспечивающих поддержание в заданных пределах таких важнейших параметров, как частота вращения ротора, давление пара в частях высокого, среднего и низкого давления и т. д.

Применительно к такому объекту управления, как турбина, целесообразно использовать регуляторы, работающие не в режиме стабилизации, который не всегда является управляемым по времени перевода объекта в заданное состояние, а регуляторы, обеспечивающие режим слежения выходных координат управляемого объекта (турбины) за требуемой траекторией их изменения [2]. Желаемая траектория выхода объекта в режим стабилизации (желаемое быстродействие системы) выбирается и задается, прежде всего, исходя, из безопасности функционирования элементов турбины и ее системы регулирования.

Математическая модель. В качестве примера рассмотрим систему регулирования частоты вращения ротора паровой энергетической турбины ПТ-25/30-90/10М, выпускаемой КТЗ. Соответствующая структурная схема, изображенная на рис. 1.

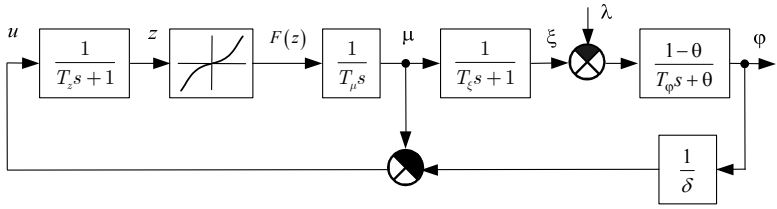


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования турбины ПТ-25/30-90/10М

Из структурной схемы видна ее математическая модель [3]. Объект управления — турбина и исполнительная часть ее системы регулирования по частоте вращения ротора. Математическая модель объекта описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} T_\varphi \, d\varphi/dt = (1-\theta)(\xi-\lambda)/\delta - \theta\varphi, \\ T_\xi \, d\xi/dt = \mu - \xi, \\ T_\mu \, d\mu/dt = \begin{cases} 0,5\dfrac{z^2}{\Delta z_0}\operatorname{sign} z & \text{при } |z| \le \Delta z_0, \\ z - 0,5\Delta z_0 \operatorname{sign} z & \text{при } |z| > \Delta z_0, \end{cases} \\ T_z \dfrac{dz}{dt} = -z + u. \end{cases} \tag{1}$$

Здесь φ — относительное изменение частоты вращения ротора турбины; ξ — относительное изменение расхода пара в турбину; μ — относительное отклонение поршня сервомотора; z — относительное отклонение поршня золотника; δ — степень неравномерности системы регулирования; $T_z, T_\mu, T_\xi, T_\varphi$ — соответствующие постоянные времени; λ — относительное отклонение электрической нагрузки генератора.

Золотник имеет нелинейную характеристику вида

$$F(z) = \begin{cases} 0,5\dfrac{z^2}{\Delta z_0}\operatorname{sign} z & \text{при } |z| \le \Delta z_0, \\ z - 0,5\Delta z_0 \operatorname{sign} z & \text{при } |z| > \Delta z_0, \end{cases}$$

где Δz_0 — зона разделения хода золотника на линейный и нелинейный участки.

Постановка задачи синтеза следящего регулятора для стабилизации угловой скорости турбины. Полагаем, что все переменные являются измеряемыми. Требуется синтезировать регулятор (найти управление) $U(t) = U\left(X, X_\Э(t), t\right)$ переводящее объект из фазового состояния $X(t)$ в ко-

нечное состояние, определяемое отслеживаемым сигналом $X_Э(t)$ и минимизирующее следующий функционал качества [4]

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{T}\left[\left(X^T(t) - X_Э^T(t)\right)\cdot Q_1(t)\cdot\left(X(t) - X_Э(t)\right) + U^T(t)\cdot r_1(t)\cdot U(t)\right]dt,$$

где $Q_1(t)$ и $r_1(t)$ — симметрические положительно определенные матрицы; $X(t) = [\varphi \quad \xi \quad \mu \quad z]$ — вектор фазовых координат объекта.

Для выполнения поставленной задачи предлагается построить следующую систему, структурная схема которой изображенная на рис. 2.

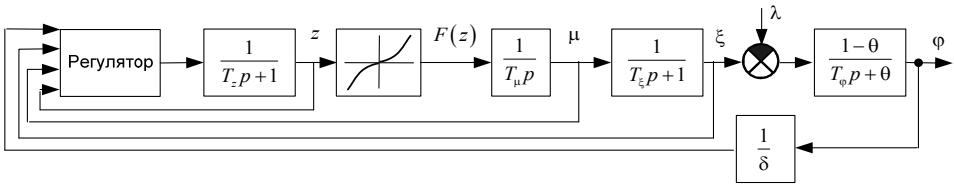


Рис. 2. Структурная схема энергетической турбины с регулятором

Возможность построения системы управления, обеспечивающий режим слежения выходных координат управляемого объекта (турбины) за требуемой траекторией их изменения можно выполнить путем проверки управляемости объекта. Если объект является управляемым, то задача может быть решена.

Проверка управляемости объекта. Рассматриваемый объект управления относится к классу нелинейным аффинным системам вида

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(X) + B(X)u(t), \qquad X(t) \in R^n, \tag{2}$$

или, записанным в форме Коши:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = \dfrac{(1-\theta)(x_2 - \lambda)/\delta - \theta x_1}{T_\varphi}, \\ \dfrac{dx_2}{dt} = \dfrac{x_3 - x_2}{T_\xi}, \\ \dfrac{dx_3}{dt} = \begin{cases} 0,5\dfrac{x_4^2}{\Delta z_0 T_\mu}\operatorname{sign} x_4 \ \text{ при } |x_4| \le \Delta z_0, \\ \dfrac{x_4 - 0,5\Delta z_0 \operatorname{sign} x_4}{T_\mu} \ \text{ при } |x_4| > \Delta z_0, \end{cases} \\ \dfrac{dx_4}{dt} = \dfrac{-x_4 + u}{T_z}, \end{cases}$$

где $x_1 = \varphi, \quad x_2 = \xi, \quad x_3 = \mu, \quad x_4 = z.$

Нелинейная характеристика золотника имеет два участка — нелинейный, описываемый параболической зависимостью и линейные участки. Золотник в любой момент времени может находиться только на одном из указанных участков. Поэтому управляемость системы можно проверить отдельно для каждого из них.

Для нелинейного участка характеристика золотника имеет вид

$$F(x_4) = 0,5\frac{x_4^2}{\Delta z_0 T_\mu}\operatorname{sign} x_4 \quad \text{при} \mid x_4 \mid \le \Delta z_0.$$

Для рассматриваемого участка матрицы $A(x)$ и $B(x)$ системы уравнений (2) имеют вид

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{-\theta x_1}{T_\varphi} & \frac{(1-\theta)x_2/\delta}{T_\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-x_2}{T_\xi} & \frac{x_3}{T_\xi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5\frac{x_4^2}{\Delta z_0 T_\mu} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-x_4}{T_z} \end{bmatrix}, \; B(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{T_z} \end{bmatrix}.$$

Для линейного участка характеристика золотника является следующей

$$F(x_4) = \frac{x_4 - 0,5\Delta z_0 \operatorname{sign} x_4}{T_\mu} \quad \text{при} \mid x_4 \mid > \Delta z_0.$$

Соответственно, для этого участка матрица $A(x)$ системы уравнений имеет вид

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{-\theta x_1}{T_\varphi} & \frac{(1-\theta)x_2/\delta}{T_\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-x_2}{T_\xi} & \frac{x_3}{T_\xi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x_4 - 0,5\Delta z_0 \operatorname{si}\, gnx_4}{T_\mu} \quad \text{при} \mid x_4 \mid > \Delta z_0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-x_4}{T_z} \end{bmatrix}.$$

Матрицы управляемости $U(x)$ для аффинной системы (2) для каждого из участков работы золотника удобно вычислить по рекуррентному соотношению [5]:

$$U^k(x) = -\left(\frac{\partial U^{k-1}(x)}{\partial x} A(x) - \frac{\partial A(x)}{\partial x} U^{k-1}(x) \right), \; k = \overline{1,\; n-1},$$

$$U^0(x) = B(x).$$

Согласно критерию управляемости, если ранг матрицы управляемости равен *n*, система является полностью управляемой.

Объект управления является системой 4-го порядка, следовательно, должно выполняться равенство $n = 4$. Поверка показала, ранг матрицы управляемости $\operatorname{rang}(U(x)) = 4$. Согласно критерию управляемости объект полностью управляем.

Для любой задачи управления можно построить такую задачу наблюдения, что решение последней будет являться и решением задачи управления, и, наоборот, для любой задачи наблюдения можно построить соответствующую задачу управления, причем решение последней будет решать первую задачу.

Следовательно, согласно принципу двойственности объект управления (2) является также полностью наблюдаемым.

Таким образом, подтверждена возможность использования регуляторов для управления турбинами в следящем режиме.

Список источников

[1] Калашников А.А. *Динамика регулирования турбин.* Москва, Энергоатомиздат, 1999, 328 с.

[2] Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин Ю.П. Синтез дополнительного регулятора для стабилизации угловой скорости ротора паровой турбины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*, 2015, № 5(62), с. 100–112. https://doi.org/10.18698/1812-3368-2015-5-100-112

[3] Мельников Д.В. Проекционно-матричный метод синтеза контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение,* 2013, № 4(93), с. 43–53.

[4] Красовский Н.Н. *Теория управления движением. Линейные системы.* Москва, Наука, 1968, 476 с.

[5] Краснощеченко В.И., Крищенко А.П. *Нелинейные системы: геометрические методы анализа и синтеза.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 354 с.

Statement of the problem of synthesizing a tracking controller for stabilizing the angular velocity of the turbine. Checking the controllability of the object

Shilenkov Ilya Dmitrievich crazyadventures51@gmail.com
Kornyushin Yuriy Petrovich theroland@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

It is proposed to use controllers that operate not in the stabilization mode, which is not always controllable in terms of the time required to bring the object to a specified state, but controllers that provide a tracking mode for the output coordinates of the controlled object to follow the required trajectory of their change. The controllability of the object (turbine), which belongs to the class of nonlinear affine systems, has been verified. It has been shown that the object is fully controllable, and according to the duality principle, it is also fully observable, thereby confirming the possibility of using tracking controllers for controlling turbines.

Keywords: *turbine, controllers, tracking, nonlinear, controllability, affine system*

УДК 004.932

Анализ тепловых снимков FLIR и построение тепловых карт с помощью Python-скрипта

Андриенко София Вячеславна andrienkosv@student.bmstu.ru
Шамаров Егор Михайлович shamarovem@student.bmstu.ru
Васильчук Николай Юрьевич vasilchuknu@bmstu.ru
Финошин Александр Викторович Finoshin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы анализа тепловых изображений, полученных с помощью инфракрасных камер FLIR. Проведено изучение принципов формирования тепловых карт и возможности их построения вручную с использованием Python-скрипта, основанного на обработке изображений в градациях серого. Приведены основные этапы анализа, используемые библиотеки и методы визуализации температурных распределений. Целью работы является исследование принципов работы тепловизионных систем, анализ изображений, получаемых в инфракрасном диапазоне, и демонстрация возможности построения тепловых карт вручную с помощью разработанного скрипта на языке Python.

Ключевые слова: *тепловизор, FLIR, инфракрасное изображение, тепловая карта, Python, обработка изображений, температура, визуализация*

Современные инфракрасные камеры (FLIR — Forward Looking Infrared) широко применяются для диагностики технических систем, контроля состояния электрооборудования, мониторинга тепловых потерь зданий и анализа процессов теплообмена в различных инженерных объектах. Основное отличие таких систем заключается в том, что они регистрируют не отраженный свет, а собственное инфракрасное излучение объектов, возникающее вследствие их температуры [1]. Это позволяет получать данные о распределении тепла по поверхности и выявлять аномальные участки перегрева, утечки тепла или дефекты изоляции, недоступные для обычных визуальных средств наблюдения.

ИК-камеры работают в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм, где большинство материалов проявляют выраженную тепловую эмиссию. На основе интенсивности этого излучения вычисляется температура поверхности. Однако специализированные устройства FLIR сохраняют результаты в собственных форматах, содержащих калиброванные температурные данные, доступ к которым без проприетарного программного обеспечения ограничен. Вследствие этого исследователям часто приходится работать только с сохраненными изображениями в стандартных форматах (JPEG, PNG и др.), где информация о температуре утрачена.

Для решения данной проблемы был разработан программный скрипт на языке Python, который позволяет восстанавливать распределение температур и строить тепловую карту, имея только исходное изображение. Основная

идея заключается в моделировании зависимости между яркостью пикселя и температурой с последующей визуализацией данных.

При реализации использовались библиотеки OpenCV [2], NumPy, Pandas и Matplotlib [3], обеспечивающие чтение изображений, числовую обработку данных и построение графиков. Алгоритм работы программы можно описать следующим образом:

– загрузка исходного изображения и преобразование его в формат оттенков серого;

– нормализация интенсивности пикселей в диапазоне от 0 до 255;

– линейное масштабирование яркости в температурный диапазон от *T_min* до *T_max*, задаваемых пользователем;

– формирование двумерной матрицы температурных значений;

– сохранение результатов в виде Excel-файла для последующего анализа;

– построение тепловой карты с использованием цветовой палитры *jet* из Matplotlib, где каждый цвет соответствует определенной температуре [3].

```
import cv2
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
T_min = 21.0 # минимальная температура
T_max = 78.1 # максимальная температура
img = cv2.imread('im2.jpg')
gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
temp = T_min + (gray.astype(np.float32) / 255) * (T_max — T_min)
temp = np.round(temp, 1)
df = pd.DataFrame(temp)
df.to_excel('pixel_temperatures.xlsx', index=False, header=False)
df = pd.read_excel('pixel_temperatures.xlsx', header=None)
plt.imshow(df.values, cmap='jet')
plt.colorbar(label='Температура °C')
plt.title("Проверочная тепловая карта из Excel")
plt.show()
print("Файл pixel_temperatures.xlsx успешно создан.")
```

Такой подход позволяет не только визуализировать распределение температуры, но и проводить числовую обработку данных: вычислять средние значения, дисперсию, определять экстремальные участки, строить профили по выбранным линиям. Преимущество ручного построения тепловых карт заключается в гибкости — исследователь может самостоятельно регулировать температурные границы, выбирать цветовую палитру, применять фильтрацию шума, а также выделять области интереса (ROI). Это особенно полезно при работе с материалами, обладающими неоднородной теплопроводностью, сложной геометрией поверхности или локальными дефектами структуры.

Дополнительно в программу могут быть интегрированы методы повышения точности, такие как адаптивная нормализация, сглаживание изображений с помощью фильтра Гаусса, а также сегментация областей по температурным кластерам. Использование методов машинного обучения и нейросетей позво-

лит автоматизировать классификацию зон перегрева, утечек тепла и других дефектов, формируя интеллектуальную систему технического контроля.

Перспективным направлением развития является добавление автоматической температурной калибровки на основе эталонных объектов, присутствующих в кадре (например, черных тел или поверхностей с известной температурой). Это позволит значительно повысить точность перевода яркостных значений в реальные температурные данные. Кроме того, можно внедрить систему адаптивного выбора цветовой палитры в зависимости от характера сцены и диапазона температур, а также реализовать интерфейс для интерактивного анализа снимков с возможностью выбора точек измерения температуры мышью. Для этих задач может использоваться библиотека Pillow [4], обеспечивающая расширенные возможности обработки растровых изображений.

Таким образом, применение Python при анализе тепловых изображений является мощным инструментом визуализации распределения температуры. Использование открытых библиотек делает процесс гибким, воспроизводимым и доступным для исследователей без необходимости приобретения дорогостоящего специализированного ПО. Разработанный подход может применяться в инженерных, лабораторных и исследовательских задачах — от анализа электрооборудования и строительных конструкций до мониторинга процессов в энергетике, машиностроении и материаловедении.

Список источников

[1] *FLIR Systems. Thermal Imaging Guidebook for Building and Renewable Energy Applications.* URL: https://www.flir.com/discover/professional-tools/thermal-imaging-guidebook/ (дата обращения 25.10.2025).

[2] *OpenCV Documentation: Image Processing.* URL: https://docs.opencv.org (accessed 26.10.2025).

[3] *Matplotlib: Visualization with Python.* URL: https://matplotlib.org (accessed 25.10.2025).

[4] *Python Imaging Library (PIL) User Guide.* URL: https://pillow.readthedocs.io (accessed 25.10.2025).

Analysis of FLIR thermal images and manual creation of heat maps using a Python script

Andrienko Sofia Vyacheslavna barkovda@student.bmstu.ru
Shamarov Egor Mikhailovich shamarovem@student.bmstu.ru
Vasilchuk Nikolai Yurievich vasilchuknu@bmstu.ru
Finoshin Alexander Viktorovich finoshin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper examines methods for analyzing thermal images obtained using FLIR infrared cameras. The principles of heat map generation and the possibility of creating them manually with a Python script based on grayscale image processing are studied. The main stages of analysis, used libraries, and visualization methods for temperature distributions are described. The purpose of this work is to study the principles of thermal imaging systems, analyze infrared images, and demonstrate the possibility of manually creating heat maps using a custom Python script.

Keywords: *thermal imager, FLIR, infrared image, heat map, Python, image processing, temperature, visualization*

УДК 004.89

Разработка прототипа автоматизированной системы разгрузки багажа с применением компьютерного зрения

Алябьев Артемий Александрович alyabevaa1@student.bmstu.ru
Алябьев Арсений Александрович alyabevaa@student.bmstu.ru
Харьков Владимир Владимирович kharkovvv@student.bmstu.ru
Корлякова Екатерина Юльевна korliakova@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен прототип полуавтоматической системы разгрузки багажа, основанный на технологиях компьютерного зрения и глубокого обучения. Представлена архитектура, в которой ядром детекции выступает нейросеть YOLOv8, обученная на специализированных данных. Показано, что использование Python, OpenCV и интерфейса Tkinter обеспечивает автоматический и ручной режимы работы. Сделаны выводы, что прототип повышает эффективность обработки багажа и может применяться для автоматизации процессов в аэропортах и логистических центрах.

Ключевые слова: *YOLOv8, компьютерное зрение, DataSet, прототип полуавтоматической системы, обработка багажа*

С каждым годом технологии искусственного интеллекта и компьютерного зрения все активнее применяются в автоматизации производственных процессов, включая транспорт и логистику. Одной из актуальных задач остается разгрузка багажа в аэропортах, традиционно требующая значительных физических усилий и сопровождающаяся рисками травматизма и снижением эффективности.

В большинстве аэропортов начальные этапы обработки багажа по-прежнему выполняются вручную, что повышает зависимость от человеческого фактора и ограничивает масштабируемость систем. В связи с этим возрастает необходимость внедрения автоматических решений, способных частично заменить ручной труд.

В представленной работе разработан прототип автоматической системы разгрузки багажа с использованием технологий компьютерного зрения и нейросетевой архитектуры YOLOv8. Разрабатываемая система обеспечивает автоматическое распознавание чемоданов и наведение разгрузочного устройства, снижая физическую нагрузку на персонал и повышая эффективность обработки багажа. В качестве инструментария применяются библиотеки OpenCV и Tkinter, что позволяет объединить визуальный анализ и управление в едином интерфейсе [1–3].

Анализ современных методов автоматизации разгрузка багажа с тележек на конвейерную ленту. Роликовая тележка с активными приводами: мобильная платформа, автоматически перемещающая багаж к краю. Требует сложных систем распознавания и точного позиционирования.

Подъемно-поворотное устройство: роботизированный комплекс, перемещающий багаж с помощью платформы и захватов. Отличается высокой точностью, но высокой стоимостью.

Подъемный привод: вертикальный механизм для подъема багажа на уровень конвейера. Эффективен в многоуровневых системах.

Металлический выдвижной трап: стационарное телескопическое устройство, которое выдвигается к тележке и втягивает багаж.

Гравитационная система: пассивное решение на основе наклонных роликов, где багаж движется под действием силы тяжести. Применима лишь в зонах с низким потоком.

Итог анализа: механизированные системы точны и быстры, но требуют больших затрат и обслуживания. Оптимальное решение — гибрид: тележка для доставки багажа, автоматический толкатель; камера компьютерного зрения, модель ИИ для расчета положения, ручной режим управления. Получена адаптивная полуавтоматическая система, сочетающая автоматизацию и надежность.

Разработка системы компьютерного зрения для детекции багажа. Ядром предложенной гибридной системы является модуль компьютерного зрения, ответственный за обнаружение чемоданов и расчет их координат.

В рамках исследования был выполнен сравнительный анализ современных архитектур нейронных сетей для решения задачи детекции чемоданов. По результатам анализа выбрана модель YOLOv8, демонстрирующая оптимальное соотношение точности и скорости обработки данных, что является критически важным требованием для систем работы в реальном времени [4].

Затем был подготовлен собственный датасет из ~12 000 изображений чемоданов, охватывающих различные условия освещения, ракурсы и сцены. Все данные были размечены в формате YOLO, что обеспечило возможность эффективного обучения модели [5–7].

Процесс обучения модели требовал тщательного подбора гиперпараметров и использования GPU для ускорения вычислений [8]. Были установлены ключевые параметры: количество эпох (300), размер изображения (640), размер батча (32). Для оптимизации применялся алгоритм AdamW с начальной скоростью обучения 0.005.

После обучения был разработан программный прототип системы визуального наведения на Python с использованием библиотек OpenCV и Tkinter [9–12]. Система поддерживает два режима работы:

– автоматический — YOLOv8 анализирует видеопоток, определяет чемоданы, вычисляет их центры и автоматически наводит виртуальный толкатель (рис. 1, 2);

– ручной — оператор самостоятельно выбирает объект на экране, указывая точку кликом мыши (либо пальцем), после чего система имитирует движение толкателя к цели (рис. 3).

В результате разработан работоспособный автоматический прототип, интегрирующий технологии компьютерного зрения с системами управления.

Система обеспечивает автоматическое распознавание багажа и наведение, сохраняя режим ручного контроля для нестандартных ситуаций.

Для оценки точности детекции использовалась метрика IoU, показывающая степень совпадения предсказанных и реальных ограничивающих рамок. На тестовых данных достигнуто значение IoU 0.68, что подтверждает удовлетворительное качество работы алгоритма для поставленной задачи (рис. 4).

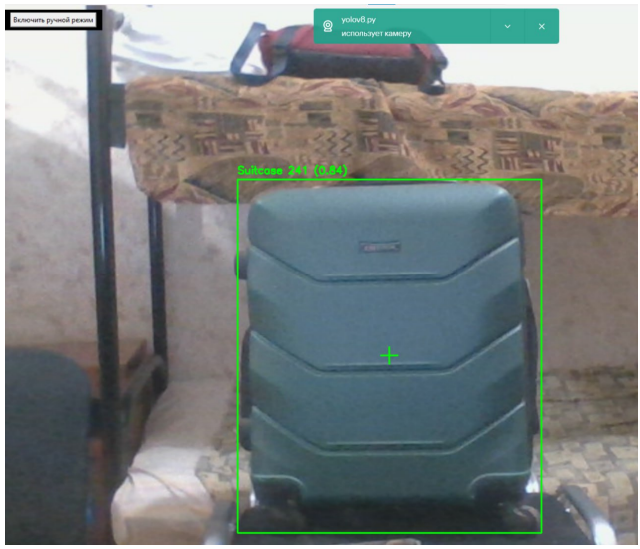


Рис. 1. Автоматическое наведение (1)

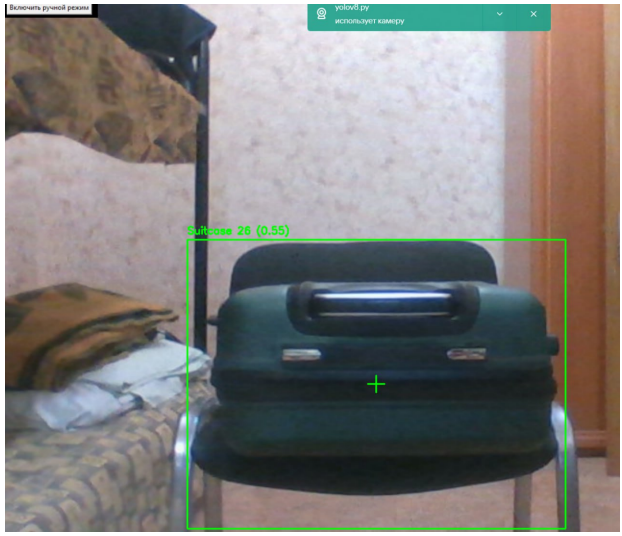


Рис. 2. Автоматическое наведение (2)

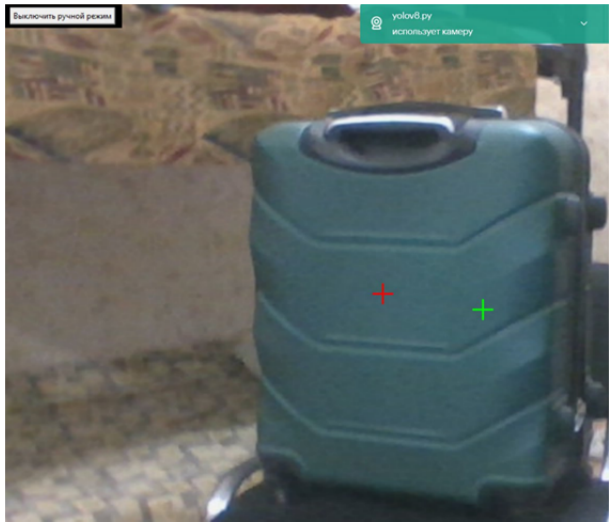


Рис. 3. Ручное наведение



Рис. 4. Результат проделанной работы

Список источников

[1] Martinez J. *TensorFlow 2.0 Computer Vision Cookbook: Implement Machine Learning Solutions to Overcome Various Computer Vision Challenges*. Birmingham, Packt Publishing, 2021.

[2] Gevorgyan M., Mamikonyan A., Beyeler M. *OpenCV 4 with Python Blueprints: Build Creative Computer Vision Projects with the Latest Version of OpenCV 4 and Python 3*. Birmingham, Packt Publishing, 2020.

[3] Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. *Глубокое обучение*. Санкт-Петербург, Питер, 2019, 480 с.

[4] *Анализ производительности моделей YOLOv8*. URL: https://habr.com/ru/articles/822917/?utm (дата обращения 05.07.2025).

[5] *Работа с YOLOv8: детекция, сегментация, трекинг объектов, подготовка собственного датасета и обучение*. URL: https://habr.com/ru/articles/821971/?utm (дата обращения 05.07.2025).

[6] *Обзор датасетов для обнаружения объектов*. URL: https://docs.ultralytics.com/datasets/detect/?utm (дата обращения 07.07.2025).

[7] *Формат аннотаций YOLOv8 для задачи обнаружения объектов*. URL: https://labelformat.com/formats/object-detection/yolov8/?utm (дата обращения 06.07.2025).

[8] Ма К., Хегде В., Йольян Л. Трехмерное глубокое обучение на Python: руководство. Москва, ДМК Пресс, 2023, 226 с.

[9] *Класс VideoCapture*. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d8/dfe/classcv_1_1VideoCapture.html (дата обращения 08.07.2025).

[10] *Tkinter — Python interface to Tcl/Tk. Документация Python 3.13.5*. URL: https://docs.python.org/3.13/library/tkinter.html (дата обращения 09.07.2025).

[11] *ImageTk — модуль для работы с изображениями в Tkinter*. URL: https://pillow.readthedocs.io/en/stable/reference/ImageTk.html (дата обращения 09.07.2025).

[12] Титов А.Н., Тазиева Р.Ф. *Введение в Tkinter. Разработка графических интерфейсов в Python*. Казань, КНИТУ, 2023, 100 с.

Development of a prototype automated baggage unloading system using computer vision

Alyabyev Artemiy Alexandrovich alyabevaa1@student.bmstu.ru
Alyabyev Arseniy Alexandrovich alyabevaa@student.bmstu.ru
Kharkov Vladimir Vladimirovich kharkovvv@student.bmstu.ru
Korlyakova Ekaterina Yulyevna korliakova@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

A prototype of a semi-automatic baggage unloading system based on computer vision and deep learning technologies is considered. The architecture is presented, where the core of detection is the YOLOv8 neural network trained on specialized data. It is demonstrated that the use of Python, OpenCV, and the Tkinter interface provides both automatic and manual operating modes. It is concluded that the prototype improves baggage handling efficiency and can be applied for automating processes in airports and logistics centers.

Keywords: *YOLOv8, computer vision, DataSet, semi-automatic system prototype, baggage handling*

Секция 6. Экология и безопасность

УДК 631.95/.57

Агроэкологическая эффективность отходов кофейного производства

Готвальд Елена Дмитриевна **lena.gotvald@icloud.com**
Тютюнькова Маргарита Викторовна **tyutyunkova82@mail.ru**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена исследованию агроэкологической эффективности отходов кофейного производства в качестве удобрения для овса сорта «Привет» на дерново-подзолистой супесчаной почве. Рассмотрено влияние отходов разной выдержки на содержание тяжелых металлов в почве и зерне. Установлено, что их внесение снижает доступные формы тяжелых металлов в почве, не превышая предельно допустимых концентраций. Выдержанные отходы повышают содержание белка и микроэлементов в зерне, улучшают плодородие почвы. Описаны методы оценки качества почвы и зерна. Подчеркнута роль отходов кофейного производства в устойчивом развитии сельского хозяйства.

Ключевые слова: *отходы кофейного производства, овес, почва, удобрение, тяжелые металлы*

Утилизация отходов остается актуальной проблемой, особенно для мегаполисов [1]. Исследования демонстрируют, что отходы кофейного производства (ОКП), образующиеся на предприятии ОАО «Русский продукт» (п. Детчино, Калужская область), могут найти эффективное применение в сельском хозяйстве. Такое использование позволит сократить объемы отходов, нуждающихся в утилизации [1].

В рамках данной работы проводится агроэкологическая оценка ОКП с различными сроками выдержки, применительно к возделыванию овса на дерново-подзолистой супесчаной почве.

Для реализации данной цели необходимо решить следующие вопросы:

1) оценить влияние ОКП разной выдержки на качество зерна овса;

2) проанализировать влияние внесения ОКП различной выдержки на динамику плодородия почвы.

Исследование проводилось в течение трех лет на экспериментальном стационарном участке, расположенном в пригородной зоне Калуги.

Главные объекты исследований: ОКП разной выдержки; дерново-подзолистая супесчаная почва на водно-ледниковых отложениях, подстилаемая мореной; сельскохозяйственная культура — овес (как основная культура).

Схема опыта:

– контроль (выращивание овса без удобрений);

– ОКП, выдержанные 2 года (ОКП (выд));

– ОКП свежие (ОКП (свеж)) [1].

Агрометеорологические условия вегетационного периода способствовали успешному росту и развитию овса. В исследовании использовались общепринятые методики, соответствующие агрономическим, экологическим и почвоведческим стандартам, а также соблюдались рекомендации по проведению полевых опытов, изложенные Б.А. Доспеховым [2].

В табл. 1–3 представлены результаты анализа данных, полученных в рамках данного исследования.

Таблица 1

Содержание белка, микроэлементов и тяжелых металлов в зерне овса [3]

Вариант	Белок, %	Микроэлементы, мг/кг	
		B	Mo
Контроль	11,7	8,5	1,6
ОКП (выд)	12,4	9,3	1,7
ОКП (свеж)	10,3	10,5	1,8

Согласно данным табл. 1, использование ОКП (выд) в качестве удобрения приводит к увеличению содержания белка в зерне на 0,7 и 0,9 % по сравнению с контрольной группой. В то же время внесение ОКП (свеж) для удобрения овса не только не способствует увеличению белка в зерне, но и снижает это показатель на 1,4 % относительно контроля.

Все виды применяемых удобрений способствовали увеличению содержания бора и молибдена в зерне, однако наименьший эффект был от ОКП (выд).

Табл. 2 содержит сведения о концентрации доступных форм ТМ в почве в зависимости от варианта опыта.

Таблица 2

Содержание доступных форм ТМ в дерново-подзолистой супесчаной почве [3]

Вариант	Тяжелые металлы, мг/кг почвы					
	Cd (ПДК = 0,5)		Pb (ПДК = 5,0)		Ni (ПДК = 5,0)	
	исходное	конечное	исходное	конечное	исходное	конечное
Контроль	0,14	0,13	4,3	4,2	1,2	1,2
ОКП (выд)	0,14	0,12	4,3	3,7	1,2	1,1
ОКП (свеж)	0,14	0,13	4,3	4,0	1,2	1,3

Согласно информации, представленной в табл. 2, можно сделать вывод о том, что добавление органических комплексных удобрений (ОКП (выд) и ОКП (свеж)) в малоплодородную почву приводит к незначительному снижению доступных форм кадмия (Cd), свинца (Pb) и никеля (Ni).

На наш взгляд, это обусловлено повышением уровня органического вещества в почве и отсутствием этих металлов в указанных отходах [3].

Начальное и конечное содержание доступных форм ТМ в почве на всех вариантах эксперимента не превышает предельно допустимых концентраций (ПДК) (табл. 3) [4].

Таблица 3

Динамика плодородия дерново-подзолистых супесчаных почв [4]

Вариант	Гумус, %		$pH_{сол}$		Обменный калий, мг/кг	
	исходное	конечное	исходное	конечное	исходное	конечное
Контроль	0,91	0,90	6,0	5,9	57	55
ОКП (выд)	0,91	0,93	6,0	6,0	57	58
ОКП (свеж)	0,91	0,94	6,0	5,6	57	58

Анализ данных, представленных в табл. 3, свидетельствует об улучшении характеристик плодородия дерново-подзолистой супесчаной почвы при использовании альтернативных удобрений. В частности, внесение ОКП (выд) и ОКП (свеж) способствует повышению количества гумуса в почве. Применение ОКП (выд) не оказывает существенного влияния на кислотность почвы, в то время как ОКП (свеж) вызывает ее небольшое увеличение (на 0,4 единицы). Также при использовании ОКП увеличивается содержание калия в почве, в то время как в контрольном образце наблюдается снижение.

Уже в первый год применения ОКП (выд) в качестве бесплатного удобрения пролонгированного действия был зафиксирован положительный эффект. Это позволяет использовать его как экономически выгодную замену другим удобрениям при выращивании овса на дерново-подзолистых супесях.

Заключение. Внесение ОКП (выд) в почву в районе пригорода Калуги способствует повышению урожайности на дерново-подзолистых супесчаных почвах с низкой плодородностью. Совместное использование ОКП (выд) демонстрирует экономическую целесообразность с точки зрения рационального использования ресурсов.

Список источников

[1] Сюняев Н.К., Малахова С.Д., Сюняева О.И., Тютюнькова М.В. *Агроэкология осадков сточных вод г. Калуга.* Калуга, Изд-во РГАУ–МСХА, 2008, 150 с.

[2] Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований).* Москва, Агропромиздат, 1985, 351 с.

[3] Тютюнькова М.В., Белопухов С.Л., Сюняев Н.К., Анфилов К.Л. *Агрохимия агросферы.* Москва, Изд-во РГАУ–МСХА, 2012, 232 с.

[4] *Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2016 году.* Калуга, ОАО «Типограф», 2017, 368 с.

Agroecological efficiency of coffee production waste

Gotvald Elena Dmitrievna lena.gotvald@icloud.com
Tyutyunkova Margarita Viktorovna tyutyunkova82@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article is devoted to the study of the agroecological efficiency of coffee production waste as fertilizer for oats of the «Hello» variety on sod-podzolic sandy loam soil. The effect of waste of different ages on the content of heavy metals in soil and grain is considered. It has been established that their application reduces the available forms of heavy metals in the soil, without exceeding the maximum permissible concentrations. Aged waste increases the content of protein and trace elements in the grain, improves soil fertility. Methods of soil and grain quality assessment are described. The role of coffee production waste in the sustainable development of agriculture was emphasized.

Keywords: *coffee production waste, oats, soil, fertilizer, heavy metals*

УДК 661.183.123.7

Red-ox иониты для сорбции кислорода из аммиачных растворов

Никишкина Анастасия Алексеевна n.nikishkina42@gmail.com
Шульга Светлана Сергеевна svet.tik01@mail.ru
Анфилов Константин Львович kanfilov@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрен процесс удаления кислорода из воды как способ предотвращения кислородной коррозии металлических поверхностей. Представлены механизмы кислородной деполяризации, особенности протекания реакций, а также влияние кислорода на коррозионную стойкость металлов. Показано, что традиционные методы дегазации имеют ряд недостатков. Рассмотрено применение редокс-ионитов как перспективных материалов для селективного удаления кислорода из водных и аммиачных растворов. Показано, что модифицированные ионами кобальта сульфокатиониты эффективно удаляют кислород и аммиак, повышают pH среды и обеспечивают противокоррозионную защиту оборудования.

Ключевые слова: *удаление кислорода, кислородная коррозия, дегазация воды, редокс-иониты, сульфокатионит, ионы кобальта, аммиачные растворы, противокоррозионная защита*

Удаление кислорода из воды — важный процесс в промышленности и коммунальном хозяйстве, так как его присутствие может вызывать нежелательные химические и физические последствия. Главная задача — предотвращение кислородной коррозии металлических поверхностей.

Кислородная коррозия (кислородная деполяризация) — это вид электрохимической коррозии металлов, которая протекает вследствие восстановления растворенного кислорода в окружающей среде. Процесс сопровождается окислением металла на анодной поверхности и восстановлением кислорода на катодной.

Анодная реакция (окисление металла) медленнее по сравнению с катодной реакцией. Происходит окисление металлического элемента. Например, для железа: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2^{e-}$ или с образованием оксидов и гидроксидов: $4Fe + + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$.

В присутствии воды и кислорода происходит катодная реакция (восстановление кислорода): $O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$.

Особенности кислородной коррозии заключаются в том, что процесс протекает при наличии кислорода в окружающей среде, обладает высокой скоростью в влажных и кислых средах, может проявляться как локально или равномерно по поверхности. Все это способствует разрушению металлов, особенно железа, стали, меди и их сплавов [1]. К последствиям такой коррозии относятся повреждение оборудования, конструкций, мостов, судов и т. д., ухудшение механических свойств и снижение долговечности изделий.

Для удаления кислорода в закрытых системах применяют термическую деаэрацию, химические восстановители, а также каталитические и мембранные методы дегазации.

Кислород необходимо удалять при подготовке воды для химических и электрохимических процессов, где требуется восстановительная или бескислородная среда, так как его присутствие вызывает окисление реагентов и катализаторов, снижая выход целевых продуктов и стабильность реакций. В производстве аммиака, гидразина и анилина кислород окисляет аммиак и промежуточные соединения, уменьшая активность катализаторов. В электрохимических системах он изменяет потенциалы электродов и искажает результаты измерений.

Кроме того, удаление кислорода необходимо при хранении и транспортировке воды, используемой как теплоноситель или технологический растворитель. Он способствует образованию оксидов металлов, разложению органических ингибиторов и развитию микроорганизмов, особенно в замкнутых системах. В биотехнологии кислород удаляют для создания анаэробных условий, а в аналитической химии — чтобы избежать его влияния на реакции восстановления. В высокотехнологичных отраслях, таких как микроэлектроника и производство катализаторов, требуется вода сверхвысокой чистоты с минимальным содержанием кислорода, для чего применяют мембранные и вакуумные методы дегазации.

Традиционные методы дегазации, такие как термическая деаэрация, продувка инертными газами или применение химических восстановителей, хотя и эффективны, имеют ряд недостатков — они требуют значительных энергозатрат, сложного оборудования, а также могут приводить к образованию побочных веществ и загрязнению среды. В связи с этим последнее время все большее внимание привлекают новые подходы, основанные на использовании функциональных сорбционных материалов. Одним из наиболее перспективных направлений является применение red-ox-ионитов.

Red-ox иониты — это полимерные материалы, в структуре которых присутствуют функциональные группы, способные к обратимым окислительно-восстановительным реакциям. В отличие от обычных катионитов и анионитов, их действие основано не только на ионном обмене, но и на участии в электронных процессах. В состав таких ионитов могут входить фенольные, тиольные, аминные или металлоорганические группы, обладающие способностью переходить из восстановленной формы в окисленную и обратно. Наиболее распространенными являются иониты на основе фенолформальдегидных и поликонденсационных смол (полистирольных), модифицированные переходными металлами, такими как железо, медь или марганец, которые придают материалу высокую редокс-активность и стабильность в щелочной среде [2].

Редокс-иониты классифицируются по типу активных центров и полимерной матрицы. Основные виды — органические, металлоорганические и композитные.

Органические редокс-иониты содержат функциональные группы, способные к обратимым окислительно-восстановительным реакциям без участия металлов. К ним относятся материалы на основе гидрохинон-квиноидных

систем, фенольных смол и проводящих полимеров, таких как полианилин и полипиррол. Они отличаются высокой химической стойкостью и могут регенерироваться электрохимически.

Металлоорганические редокс-иониты содержат центры переходных металлов (Fe, Cu, Mn, Co), которые меняют степень окисления в процессе сорбции кислорода. Они обладают высокой активностью, но менее устойчивы в щелочной среде и требуют защиты от вымывания металлов, поскольку часто не фиксированы химически [3].

Композитные редокс-иониты представляют собой сочетание органических или металлоорганических компонентов с неорганическими носителями — силикагелем, углеродом или цеолитами. Такие материалы более прочны и устойчивы к высоким температурам.

Механизм сорбции кислорода на редокс-ионитах заключается в его восстановительном связывании активными центрами материала. Молекулярный кислород, растворенный в аммиачном растворе, взаимодействует с восстановленной формой функциональных групп ионита, переходящей при этом в окисленное состояние. В результате кислород превращается в гидроксид-ион или другие формы, не способные окислять аммиак и металл.

Применение редокс-ионитов для удаления кислорода из аммиачных растворов обладает рядом преимуществ. Во-первых, процесс может осуществляться при умеренных температурах и без добавления химических реагентов. Во-вторых, такие иониты обеспечивают селективное связывание кислорода, не влияя на концентрацию аммиака и других компонентов раствора. В-третьих, возможность регенерации делает процесс экономичным и экологически устойчивым. Это особенно важно при эксплуатации систем очистки и регенерации аммиачных растворов, холодильных установок с аммиачным хладагентом, а также в установках синтеза аммиака, где требуется полное исключение кислорода для предотвращения побочных реакций [4].

Несмотря на преимущества, применение редокс-ионитов для удаления кислорода из воды имеет недостатки. Их сорбционная емкость невысока, поэтому для эффективной работы требуется большой объем материала или многократная циркуляция раствора. Со временем активные центры деградируют при циклах окисления и восстановления, особенно в щелочной среде, что снижает эффективность и срок службы ионита. Возможное высвобождение ионов металлов ухудшает качество воды, а регенерация сорбента требует дополнительных реагентов или электрохимической обработки. Активность также зависит от состава среды: аммиак и соли могут снижать эффективность сорбции. Несмотря на эти ограничения, метод остается перспективным при дальнейшем повышении стабильности ионитов.

Однако иногда возникают ситуации, при которых в одном из контуров циркулирует вода, а в смежном раствор аммиака высокой концентрации. При нарушении герметичности аммиак может проникать в смежный контур и вызывать коррозионные повреждения деталей, изготовленных из медных сплавов. Требуется экстренная противокоррозионная защита. Задача осложняется большим сродством аммиака и воды и возможным присутствием кислорода.

Для таких ситуаций нами разработан способ одновременного удаления из раствора растворенного кислорода и следовых количеств аммиака. Дело в том, что сульфокатионит марки КУ-2 сорбирует из раствора солей Co^{2+} ионы в виде аква-комплексов $[Co(H_2O)_6]^{2+}$. При контакте с раствором, содержащим растворенный кислород и аммиак, происходит ступенчатая замена лигандов в соответствии с гипотезой Бьерума:

$$[Co(H_2O)_6]^{2+} + 6\ NH_3 + 0{,}5O_2 = [Co(NH_3)_6]^{3+} + 2OH^- + 5\ H_2O$$

Одновременно происходит окисление кобальта и поглощение кислорода из раствора. Хочется обратить внимание на то, что в растворе при удалении кислорода увеличивается значение pH. Оба фактора работают на противокоррозионную защиту.

Проведенные исследования показали, что емкость по аммиаку катионита, модифицированного кобальтом, существенно превосходит емкость промышленного сульфокатионита КУ-2. При концентрации в растворе аммиака 10 % ионы кобальта из материала практически не вымываются. Что указывает на высокую устойчивость Red-Ox ионита и эффективность его применения.

Список источников

[1] Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Ленинград, Химия, 1983, 295 с.

[2] Дмитренко В.П., Мессинева Е.М., Фетисов А.Г. Управление экологической безопасностью в техносфере. Санкт-Петербург, Лань, 2023, 428 с.

[3] Грушко М.П., Мелякина Э.И., Волкова И.В., Зайцев В.Ф. Прикладная экология. Санкт-Петербург, Лань, 2023, 268 с.

[4] Тулупов П.Е. Стойкость ионообменных материалов. Москва, Химия, 1984, 231 с.

Red-ox ionites for oxygen sorption from ammonia solutions

Nikishkina Anastasia Alekseevna n.nikishkina42@gmail.com
Shulga Svetlana Sergeevna svet.tik01@mail.ru
Anfilov Konstantin Lvovich kanfilov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article discusses the process of removing oxygen from water as a way to prevent oxygen corrosion of metal surfaces. The mechanisms of oxygen depolarization, the peculiarities of the reactions, as well as the effect of oxygen on the corrosion resistance of metals are presented. It is shown that traditional degassing methods have a number of disadvantages. The use of redox ionites as promising materials for the selective removal of oxygen from aqueous and ammonia solutions is considered. It has been shown that sulfocationites modified with cobalt ions effectively remove oxygen and ammonia, increase the pH of the medium and provide anticorrosive protection of equipment.

Keywords: *oxygen removal, oxygen corrosion, water degassing, redox ionites, sulfocationite, cobalt ions, ammonia solutions, anticorrosive protection*

УДК 661.183.12:628.161.3

Комплексное использование ионитов в очистке технологических вод

Ильющенко Алина Александровна alina_ily1719@mail.ru
Анфилов Константин Львович kanfilov@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена исследованию проблемы очистки технологических вод на различных стадиях производственных процессов, уделяя особое внимание финишной очистке и удалению малых концентраций растворенных веществ. Рассмотрены существующие методы очистки — механические, химические, физико-химические и биологические — с акцентом на их эффективность в снижении остаточных загрязнений. Наиболее эффективным методом для завершающей очистки, как приводится в работе, является ионный обмен, роль которого выполняют иононитые материалы. Представлены свойства и структуры ионитов: их твердая, прочная и химически устойчивость, способность к ионизации и обмену ионами с электролитами.

Ключевые слова: *технологические воды, методы очистки, иониты, тяжелые металлы, катиониты*

В ходе различных производственных процессов часто образуются технологические воды, содержащие самые разные растворенные вещества. Концентрации веществ в растворе могут быть самые различные. В связи с этим, для их удаления применяют различные методы: механические, химические, физико-химические, биологические. Наиболее ответственным этапом является финишная очистка — удаление малых (остаточных) количеств растворенных веществ. Наиболее эффективным методом в таких случаях выступает ионный обмен, главным участником которого являются ионообменные материалы — иониты.

Цель работы — очистка технологических вод, с помощью комплексного использования ионитов.

Иониты, в обычном понимании, — это твердые, зернистые, порошкообразные, формованные или волокнистые, механически прочные, химически устойчивые, нерастворимые вещества, содержащие в своем составе функциональные (ионогенные) группы, способные к ионизации и обмену ионами с электролитами [1]. Главным признаком ионита является эквивалентность ионного обмена. При ионизации функциональных групп образуются две разновидности ионов:

– фиксированные ионы, закрепленные на полимерном каркасе и неспособные покинуть фазу ионита;

– противоионы (обменные ионы) ионита, эквивалентно равные фиксированным ионам, но противоположные по знаку, способные перейти во внешний раствор в обмен на строго эквивалентные количества других ионов того же знака, поступающих из внешнего раствора.

Так как фаза ионита в целом электронейтральна, то суммарный заряд всех противоионов должен быть равен общему заряду фиксированных ионов.

Часто иониты используют для удаления из воды ионов тяжелых металлов, таких как ионы меди (Cu^{2+}), никеля (Ni^{2+}), кобальта (Co^{2+}), хрома (Cr^{3+}) и т. п. После полного обмена ионов раствора на подвижные ионы сорбента процесс поглощения прекращается. Происходит насыщение ионита ионами сорбированного металла. Для дальнейшего использования ионообменного материала необходимо осуществлять процесс регенерации. Это специальная процедура, требующая времени, оборудования, финансовых затрат, приготовления регенерирующего раствора [2].

Для сорбции из растворов катионов применяют катиониты. Самым востребованным из них является сульфокатионит марки КУ-2. Он может использоваться для поглощения самых разных катионов. При этом его эквивалентная обменная емкость по различным ионам будет иметь одинаковые значения.

Ионы тяжелых металлов в водных растворах находятся в гидратированном состоянии. В виде координационных соединений с молекулами воды — аквакомплексов: $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$, $[Ni(H_2O)_4]^{2+}$, $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ и т. п. Об этом свидетельствует изменение окраски ионитов после сорбции, полностью соответствующее окраске гидратированных ионов конкретных металлов. Сорбируя ионы меди, иониты окрашиваются в светло синий цвет. При сорбции ионов никеля — в зеленый, кобальта — розовый.

Молекулы воды в комплексных ионах, в соответствии с теорией ступенчатого комплексообразования Бьеррума, могут замещаться частицами, имеющими большую основность. Такими молекулами могут быть молекулы аммиака [3].

Если осуществлять сорбцию аммиака из водных растворов, эквивалентная емкость ионита будет строго соответствовать числу закрепленных противоионов, так как фактически сорбироваться будут ионы аммония (NH_4^+), образующиеся в растворе. После насыщения ионита ионами аммония, естественно, потребуется регенерация, включающая стандартные процедуры и затраты. Если же для сорбции аммиака использовать иониты, насыщенные ионами меди (II), никеля (II) или кобальта (II), то молекулы аммиака будут замещать в металлокомплексных структурах ионита молекулы воды, образуя соответствующие аминокомплексы:

$$[Cu(H_2O)_6]^{2+} + 6\ NH_3 = [Cu(NH_3)_6]^{2+} + 6\ H_2O$$
$$[Ni(H_2O)_6]^{2+} + 6\ NH_3 = [Ni(NH_3)_6]^{2+} + 6\ H_2O$$
$$[Co(H_2O)_6]^{2+} + 6\ NH_3 = [Co(NH_3)_6]^{2+} + 6\ H_2O$$

В этом случае число сорбированных аммиачных частиц будет значительно превышать емкость ионита по ионам аммония.

Авторами были проведены эксперименты поглощения аммиака из растворов солевыми формами ионитов, которые показали, что статическая обменная емкость по аммиаку ионита в медной форме превышает емкость исходного сульфокатионита КУ-2 в 2,29 раза; катионита в никелевой форме — в 2,09 раза; катионита в кобальтовой форме — в 1,98 раза. Одновременно бы-

ла исследована устойчивость солевых форм ионитов. При этом важно отметить, что при сорбции аммиака практически не происходит вымывание из материалов ионов металлов [4].

Следует обратить внимание на то, что аминокомплексы меди, никеля и кобальта имеют окраску, значительно отличающуюся от окраски аквакомплеков — более глубокую. Окраска катионита в медной форме из светло-синего переходит в интенсивно-фиолетовую. Окраска катионита в кобальтовой форме из интенсивно-розового переходит в фиолетово-коричневую. Это открывает возможность использования солевых форм катионита КУ-2 в качестве индикаторов наличия аммиака в водных растворах.

Таким образом, целесообразно предложить комплексное поэтапное использование сульфокатионита КУ-2:

– на первом этапе для очистки воды от солей тяжелых металлов;

– на втором, без регенерации, для индикации аммиака, с попутной возможность эффективной сорбции;

– осуществление регенерации;

– запуск нового цикла использования.

Осуществление предлагаемого комплексного подхода позволит значительно уменьшить экономические затраты и повысить эффективность использования сорбентов.

Список источников

[1] Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Ленинград, Химия, 1983, 295 с.

[2] Саладзе К.М. О путях целенаправленной модификации ионообменных материалов. Москва, Химия, 1981, с. 73–82.

[3] Тулупов П.Е. Стойкость ионообменных материалов. Москва, Химия, 1984, 232 с.

[4] Егоров В.В. Экологическая химия. Санкт-Петербург, Лань, 2025, 184 с.

Comprehensive use of ion exchangers in the treatment of process water

Ilyushenko Alina Alexandrovna alina_ily1719@mail.ru

Anfilov Konstantin Lvovich kanfilov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article is devoted to the study of the problem of processing water treatment at various stages of production processes, with a special focus on finishing treatment and removal of small concentrations of dissolved substances. The existing methods of purification — mechanical, chemical, physical-chemical and biological — are considered, with an emphasis on their effectiveness in reducing residual contaminants. The most effective method for the final purification, as given in the work, is ion exchange, the role of which is performed by ion-exchange materials. The properties and structures of ion exchangers are presented: their solid, strong and chemically stable, ability to ionize and exchange ions with electrolytes.

Keywords: *process water, purification methods, ionites, heavy metals, and cation exchangers*

УДК 628.11

Комплексная оценка динамики водопользования Калужской области

Раздобреева Полина Ивановна polinarazd123@gmail.com
Зубарева Анжелика Алексеевна zubareva.angelika20054@mail.ru
Жукова Юлия Михайловна zjuliam@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлены результаты комплексного анализа водопотребления в Калужской области за период 2012–2024 гг. Выявлена устойчивая тенденция к снижению общего объема водопотребления на 22 % с перераспределением структуры в пользу хозяйственно-бытовых нужд (рост до 73 %). Установлены ключевые проблемы: высокие эксплуатационные потери и необходимость модернизации инфраструктуры. Определены перспективные направления развития регионального водохозяйственного комплекса.

Ключевые слова: *Калужская область, водопотребление, региональный водохозяйственный комплекс, водные ресурсы*

Вода является исчерпаемым и уязвимым природным ресурсом, от рационального использования которого зависит не только устойчивое экономическое развитие регионов, но и качество жизни населения. В условиях возрастающей антропогенной нагрузки и наблюдаемых климатических изменений проблемы обеспечения населения и отраслей экономики качественной водой, является актуальной [1, 2]. Эти проблемы в полной мере касаются и Калужской области, которая характеризуется значительной промышленной освоенностью и интенсивным развитием агропромышленного комплекса, что создает комплексное давление на водные объекты Калужской области.

Комплексная оценка динамики и структуры водопотребления в Калужской области была проведена за период 2012–2024 гг. Были проанализированы данные по Калужской области.

В самом общем смысле под водопотреблением понимается использование водных ресурсов для удовлетворения нужд населения, промышленности и сельского хозяйства. Однако за этим простым определением скрывается сложная, многокомпонентная система, являющаяся точным индикатором экономического и социального развития территории [2].

Водопотребление — это буквально основа современной цивилизации. Это не просто забор воды из рек и подземных источников. Это сложный процесс, включающий в себя:

– забор воды из природных источников;

– подготовку и транспортировку до потребителя (очистку, умягчение, обеззараживание);

– непосредственное использование в самых разных целях — от чашки утреннего кофе до работы гигантского промышленного предприятия;

– водоотведение и очистку образовавшихся сточных вод.

Таким образом, анализируя водопотребление, мы на самом деле изучаем «метаболизм» региона — скорость и эффективность, с которой он потребляет и перерабатывает один из ключевых ресурсов.

Традиционно водопотребление делится на несколько ключевых категорий.

Хозяйственно-питьевое водопотребление: наиболее стабильная и социально значимая категория. Ее объем зависит от численности населения, уровня благоустройства жилого фонда и норм потребления.

Производственное водопотребление: наиболее динамичная категория, чутко реагирующая на состояние экономики. Снижение объемов часто свидетельствует не о спаде, а о модернизации — внедрении водооборотных систем и менее водоемких технологий.

Сельскохозяйственное водоснабжение и орошение: имеет выраженную сезонность и сильно зависит от климатических условий и государственной поддержки АПК. Прочие нужды: может включать в себя широкий спектр активностей — от заполнения парковых прудов до тушения пожаров, что объясняет ее изменчивость.

Конкретная структура водопотребления в Калужской области — это «диагностическая карта», показывающая, кто является главным «потребителем воды» в экономике [3]. На графиках (рис. 1–5) представлена тенденция изменения водопотребления в регионе за последние 12 лет.

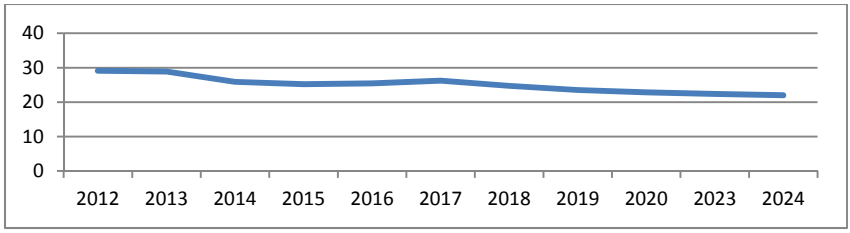


Рис. 1. Изменения баланса водопользования на хозяйственно-бытовые нужды, млн м^3

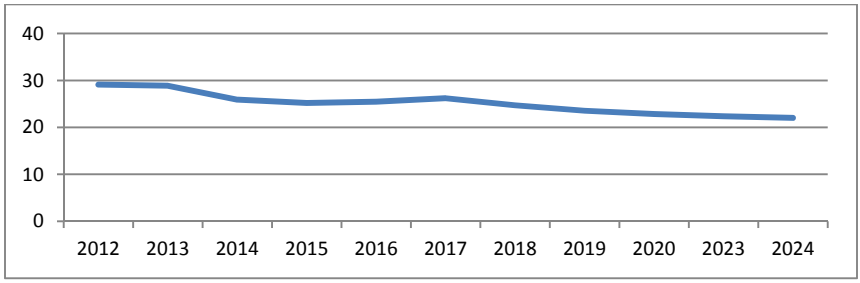


Рис. 2. Изменение баланса водопользования производственных нужд, млн м^3

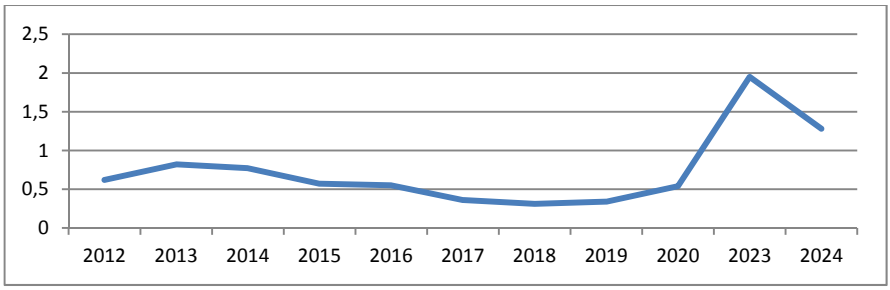


Рис. 3. Изменение баланса водопользования сельхозводоснабжение

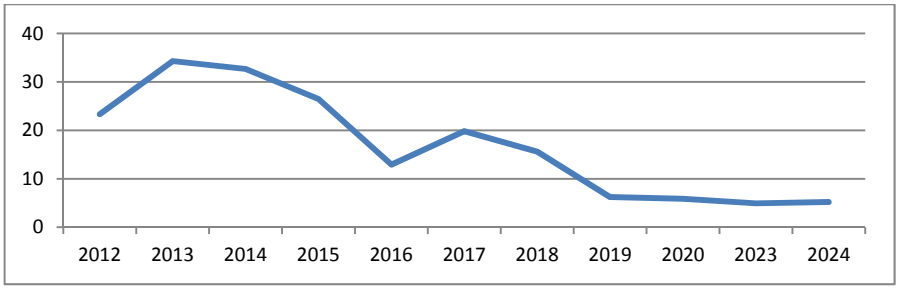


Рис. 4. Изменение баланса водопользования на прочие нужды

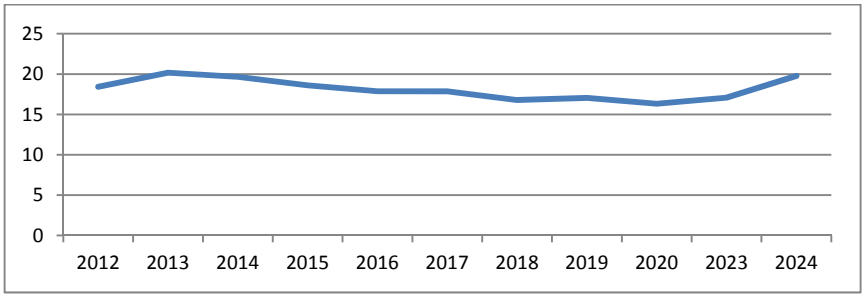


Рис. 5. Изменение баланса потерь при транспортировке

Проведенный анализ выявил системные изменения в водохозяйственном комплексе Калужской области, которые требуют комплексной интерпретации. Выявленное снижение общего водопотребления на 22 % и кардинальное изменение его структуры (рост доли хозяйственно-бытовых нужд до 73 % из общего объема водопотребления) является прямым следствием макроэкономических процессов в регионе. Резкое сокращение промышленного водопотребления коррелирует с периодом активной реиндустриализации области после 2012 года, когда происходила замена старых, водоемких производств на современные предприятия автосборочного кластера и фармацевтики, ха-

рактеризующиеся значительно более низкой водоемкостью и широким использованием оборотных систем водоснабжения [4]. Данный тренд соответствует общероссийской тенденции, однако в Калужской области он выражен более ярко в силу ее инвестиционной привлекательности и целенаправленной политики по сохранению водных ресурсов. Но есть и негативные факторы, которые сохраняются.

Стабильно высокий уровень потерь воды при транспортировке (17–20 млн м³ ежегодно) (рис. 5) на фоне снижающегося водопотребления указывает на растущую неэффективность распределительных сетей. Это приводит к двойному негативному эффекту: прямым финансовым потерям для ресурсоснабжающих организаций и возрастанию антропогенной нагрузки на водоисточники, из которых забирается излишний объем воды. Указанная проблема усугубляется изменением структуры потребления: рост доли питьевого водоснабжения предъявляет более высокие требования к качеству и бесперебойности работы сетей, что требует не просто ремонта, а их комплексной модернизации.

Заключение. На основании комплексного анализа данных за 2012–2024 гг. сформулированы следующие выводы.

Водохозяйственный комплекс Калужской области претерпел кардинальную структурную перестройку, выразившуюся в снижении общего водопотребления на 22 % и переходе к доминированию хозяйственно-питьевого водоснабжения (73 % в 2024 г.).

Выявлена ключевая проблема — высокий уровень эксплуатационных потерь (до 19,77 млн м³ в 2024 г.), который свидетельствует о критическом износе распределительных сетей и обуславливает необходимость их приоритетной модернизации.

Перспективы дальнейших исследований видятся в детальном технико-экономическом анализе эффективности модернизации инфраструктуры, а также в разработке математических моделей для прогнозирования водных нагрузок с учетом инвестиционной политики и климатических изменений.

Список источников

[1] *Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 24.04.2024)*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения 20.06.2025).

[2] *О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году*. Государственный доклад. Москва, Минприроды России, 2024, 700 с.

[3] *О состоянии окружающей среды в Калужской области за 2023 год*. Доклад. Калуга, Министерство природных ресурсов и экологии Калужской области, 2024.

[4] *Стратегия социально-экономического развития Калужской области до 2030 года (утв. Постановлением Правительства Калужской области от 28.12.2018 № 784)*. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&infostr=xO7q8+zl7fIg7vLu4fDg5uDl8vH/IO3lIOIg7+7x6+Xk7eXpIPDl5ODq9ujo&backlink=1&nd=108035964&page=1&rdk=5 (дата обращения 20.06.2025).

Comprehensive assessment of the dynamics of water use in the Kaluga region

Razdobreeva Polina Ivanovna polinarazd123@gmail.com
Zubareva Angelika Alekseevna zubareva.angelika20054@mail.ru
Zhukova Yulia Mikhailovna zjuliam@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The results of a comprehensive analysis of water consumption in the Kaluga region for the period 2012–2024 are presented. A steady trend has been revealed towards a 22 % decrease in total water consumption with a redistribution of the structure in favor of household needs (an increase to 73 %). Key problems have been identified: high operational losses and the need to modernize the infrastructure. Promising directions for the development of the regional water management complex have been identified.

Keywords: *Kaluga region, water consumption, regional water management complex, water resources*

УДК 665.6

Исследование эффективности применения современных сорбентов для ремедиации нефтезагрязненных вод и почв

Жукова Юлия Михайловна dazhf1@mail.ru
Баранов Максим Сергеевич bar_03@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Загрязнение почв и водных объектов нефтью и нефтепродуктами представляет собой одну из наиболее серьезных экологических угроз, приводя к деградации природных экосистем, снижению продуктивности сельскохозяйственных земель и рискам для здоровья населения. В связи с этим, в настоящем исследовании проведен комплексный анализ научных данных, посвященных сорбентам, применяемым для удаления нефтяных загрязнений из почвы и воды. Рассмотрены основные типы сорбционных материалов, а также их физико-химические свойства, определяющие эффективность в различных условиях.

Ключевые слова: *нефтепродукты, загрязнение почв, загрязнение воды, сорбенты, органические сорбенты, минеральные сорбенты, синтетические сорбенты, эффективность сорбентов, гидрофобность, биоремедиация, очистка окружающей среды, рекультивация, экологическая безопасность, абсорбция нефтепродуктов*

Загрязнение почв и воды нефтепродуктами является одной из самых острых экологических проблем, оказывая долговременное разрушительное воздействие на экосистемы, сельское хозяйство, водные ресурсы и здоровье человека.

Нефтепродукты нарушают естественную структуру почвы, ее физико-химические и биологические свойства. Особенно сильно подвержены влиянию подзолистые почвы, в которых изменяется кислотность, снижается водоудерживающая способность и емкость катионного обмена (способность удерживать питательные вещества), что приводит к ухудшению плодородия.

Загрязненная нефтью почва покрывается гидрофобной пленкой, которая препятствует проникновению воды, вызывая эрозию и ухудшая структуру почвы. Эти изменения ведут к уменьшению разнообразия микробиоты и нарушают функции экологической системы почвы, что негативно сказывается на росте растений и приводит к дисбалансу питательных веществ [1].

Нефтепродукты, попадая в водоемы, формируют пленку на поверхности воды, что препятствует газообмену и снижает содержание кислорода, необходимого для жизни водных организмов. Это вызывает массовую гибель флоры и фауны, нарушение пищевых цепей и деградацию водных экосистем. Загрязненная вода становится непригодной для питья, орошения и промышленного использования, что создает угрозу для здоровья человека и экономической деятельности [2].

Нефтяное загрязнение почвы и воды требует комплексных мер по очистке и рекультивации, так как последствия носят долгосрочный и кумулятив-

ный характер. Восстановление почв и вод требует использования биологических, физических и химических методов, включая применение эффективных сорбентов для удаления нефтепродуктов.

Рассмотрим наиболее известные виды сорбентов, которые применяются для очистки почвы от нефтяных загрязнений, проведем сравнительный анализ их эффективности и экономичности, выявим преимущества и недостатки и сделаем вывод, какой из представленных материалов показывает наилучшую эффективность.

Таблица 1

Виды сорбентов для очистки почвы от нефтяных загрязнений [1, 3]

Тип сорбента	Подкатегория	Пример материалов	Механизм действия
Органические	Натуральные	Торф, солома, опилки, кора, шерсть, перья, банасса (отходы сахарного тростника)	Адсорбция
Неорганические	Натуральные	Вермикулит, пемза	Адсорбция
Синтетические	Полимерные	Полипропилен, полиуретан, полиэтилен	Адсорбция
Биосорбенты (комбинированные)	Сорбент + микроорганизмы	«Сорбонафт» с иммобилиз. бактериями/дрожжами/грибами	Сорбция + биодеградация

Таблица 2

Сравнение эффективности и экономичности сорбентов [1, 3]

Тип сорбента	Эффективность (сорбционная способность, соотношение нефти к сорбенту)	Скорость очистки	Экономическая выгода	Основные преимущества	Основные недостатки
Органические	Низкая (~2:1 — 10:1)	Низкая — умеренная	Высокая (низкая стоимость, локальная доступность)	Биоразлагаемость, низкая стоимость, защита фауны	Низкая эффективность, вторичное загрязнение
Неорганические	Очень низкая (~2:1)	Низкая	Высокая (очень низкая стоимость)	Очень дешевые и доступные	Очень низкая эффективность, большой объем отходов

Окончание табл. 2

Тип сорбента	Эффективность (сорбционная способность, соотношение нефти к сорбенту)	Скорость очистки	Экономическая выгода	Основные преимущества	Основные недостатки
Синтетические	Очень высокая (до 40:1)	Высокая	Умеренная–низкая (высокая закупочная цена, но возможна регенерация)	Высокая эффективность, возможность повторного использования	Высокая стоимость, проблемы с утилизацией, не разлагаются
Биосорбенты (комбинированные)	Очень высокая (полная деградация нефти)	Высокая (полная очистка за 3 месяца исследований)	Умеренная — высокая (высокая эффективность окупает затраты, возможна регенерация и использование как удобрение)	Полное уничтожение загрязнения, экологичность, устойчивость к условиям среды	Требуют контроля условий (питательные вещества в бедных почвах), более сложное производство

Исходя из данных, представленных в таблицах, можно сделать вывод, что наиболее эффективными являются синтетические сорбенты (по сорбционной способности на единицу массы) и биосорбенты (по способности к полному уничтожению загрязнения). В долгосрочной перспективе для очистки почв биосорбенты имеют преимущество перед другими сорбентами, так как они не просто собирают, но и разлагают нефть, полностью устраняя загрязнение.

Чтобы выбрать наиболее эффективный вид сорбента, нужно учитывать какая задача перед нами стоит:

– для быстрого сбора разлива при ограниченном бюджете и доступности органические сорбенты (торф, солома) могут быть лучшим выбором из-за очень низкой стоимости;

– для масштабных и длительных операций, где важна скорость и эффективность, а также минимизация отходов, синтетические сорбенты могут быть выгодны за счет возможности регенерации и многократного использования;

– для полной и экологичной ремедиации загрязненных почв, особенно в чувствительных экосистемах, биосорбенты являются наиболее перспективными и самыми выгодными в долгосрочной перспективе, так как они приводят к полному восстановлению почвы без необходимости утилизации огромного количества загрязненного материала.

Критически важным при выборе сорбента является учет полного жизненного цикла, включая логистику, сбор использованного сорбента, хранение и утилизацию. Неконтролируемое использование сорбентов, особенно сыпучих, может привести к более серьезным экологическим и экономическим проблемам, чем сам разлив [1, 3].

Таким образом, сорбенты для очистки почвы представляют собой инструмент ремедиации, позволяющий восстанавливать плодородие и биологическую ценность земель, нарушенных нефтяными загрязнениями.

Сочетание сорбентов с методами фиторемедиации и микробиологической деструкции позволяет разрабатывать комплексные и долгосрочные стратегии возвращения загрязненных территорий в хозяйственный оборот, что имеет огромное значение для устойчивого развития регионов с интенсивной добычей и транспортировкой нефти.

Также в рамках данного исследования рассмотрим наиболее известные виды сорбентов, которые применяются для очистки водной среды от нефти и нефтепродуктов. Проведем сравнительный анализ их ключевых характеристик и на основании полученных результатов определим, какой из представленных материалов демонстрирует наивысшую эффективность и экономичность.

Таблица 3

Виды сорбентов для очистки воды от нефти и нефтепродуктов [2, 4]

Категория сорбентов	Примеры материалов	Основные свойства
Природные сорбенты		
Органические	Торф, мох, солома, опилки, кора, шелуха гречихи, лигнин, шерсть	Доступность, низкая стоимость, биоразлагаемость, умеренная нефтеемкость
Неорганические	Вспученный вермикулит, перлит, глины, цеолиты, горелые породы	Высокая механическая прочность, термостойкость, возможность регенерации
Синтетические сорбенты		
Волокнистые	Полипропилен, полистирол, пенополиуретан, синтепон, лавсан	Высокая нефтеемкость, плавучесть, многократное использование, регенерация
Порошковые и гранулированные	Карбамидоформальдегидные смолы, пенополистирол, полипропилен, микробаллоны	Высокая скорость сорбции, эффективность для тонких пленок, возможность модификации

Окончание табл. 3

Категория сорбентов	Примеры материалов	Основные свойства
Модифицированные и композитные		
На основе отходов	Древесно-полистирольное волокно (ДПВ), сорбенты из окорки, бересты, опилок	Сочетание доступности и повышенной нефтеемкости, экологичность.
Углеродные	Активированные угли (АГ-3, БАУ, КАД-йодный), буроугольные сорбенты (БУС), модифицированный графит	Высокая емкость по растворенным НП, развитая пористость, использование на стадии доочистки
Специализированные сорбенты		
Высокоэффективные	Акант-мезо, пенографит, СТРГ, сорбенты на основе базальтового волокна	Максимальная нефтеемкость, высокая степень очистки, многократность циклов

Ключевыми показателями эффективности сорбентов для очистки воды от нефти и нефтепродуктов являются:

– нефтеемкость — способность поглощать максимальное количество нефти;

– гидрофобность — минимальное поглощение воды для сохранения плавучести;

– степень отжима — возможность регенерации сорбента и извлечения нефти.

Идеальный сорбент сочетает высокую нефтеемкость с низким водопоглощением, что обеспечивает его селективность и работоспособность на поверхности воды, а возможность отжима делает процесс экономически целесообразным за счет многократного использования материала.

Таблица 4

Сравнительная эффективность сорбентов [2, 4]

Материал	Нефтеемкость, г/г	Водопоглощение, г/г	Степень отжима, %	Примечание
Природные органические				
Торф	6–18	1,6–24	0–74	Доступные, но высокое водопоглощение
Мох	3,5–5,8	3,1–3,5	–	Низкая стоимость
Шерсть	8–10	4,5	87	Высокая степень отжима
Опилки	1,7–4,7	4,1–4,3	10–45	Низкая эффективность

Окончание табл. 4

Материал	Нефтеемкость, г/г	Водопоглощение, г/г	Степень отжима, %	Примечание
Синтетические волокнистые				
Полипропилен (волокно)	12–40	1,6	40–80	Высокая емкость, многократное использование
Синтепон	46,3	42–52	94	Высокая емкость, высокое водопоглощение
Пенополиуретан	14–50	1,3–26	75–85	Высокая скорость сорбции, регенерация
Синтетические гранулированные				
Карбамидоформальдегидная смола	23–40	0,1–14	0–60	Высокая емкость, хрупкость
Пенополистирол (гранулы)	9,3	4,5	0	Эффективен только для тонких пленок
Модифицированные/Композитные				
Древесно-полистирольное волокно	20–30	–	80	Сочетание доступности и эффективности
Базальтовое волокно	37–46	0,5	27–80	Высокая прочность, термостойкость
Графит модифицированный	40–60	0,5–10	10–65	Высокая емкость, дороговизна
Углеродные сорбенты				
Активированные угли	1–5	–	–	Эффективны для растворенных НП, но не для сбора с поверхности
Буроугольные сорбенты (БУС)	4–8	–	–	Дешевые, подходят для фильтрации

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее эффективными и экономически выгодными сорбентами для очистки воды от нефти и нефтепродуктов являются.

Синтетические волокнистые материалы (полипропилен, пенополиуретан) обладают высокой нефтеемкостью (до 40–50 г/г), возможностью многократного использования и регенерации, устойчивостью к воздействию воды и механическим нагрузкам. Они особенно эффективны для ликвидации аварийных разливов и сбора нефти с поверхности воды.

Композитные материалы (древесно-полистирольное волокно, модифицированные природные сорбенты) сочетают доступность сырья и повышенную нефтеемкость, что делает их конкурентоспособными и экологичными.

Природные сорбенты (торф, мох, отходы деревопереработки), несмотря на умеренную нефтеемкость, остаются востребованными благодаря низкой стоимости, доступности и биоразлагаемости. Они эффективны при небольшом уровне загрязнения и в комбинированных системах очистки.

Углеродные сорбенты (активированные угли, буроугольные сорбенты) целесообразно использовать на стадии глубокой доочистки для удаления растворенных нефтепродуктов, но их применение для сбора нефти с поверхности — неэффективно.

Сорбенты для очистки воды выполняют незаменимую роль в сохранении водных ресурсов, обеспечивая многоступенчатую защиту от нефтяных загрязнений. Они являются основным инструментом для оперативного реагирования при аварийных разливах, эффективно локализуя и поглощая нефтяные пятна на поверхности водоемов, что предотвращает катастрофические последствия для водных экосистем. Благодаря своей универсальности эти материалы позволяют проводить полный цикл очистки — от удаления свободной нефти до тонкой доочистки сточных вод от эмульгированных и растворенных форм загрязнителей. Использование как высокоемких синтетических, так и доступных природных сорбентов делает эту технологию экономически эффективной и экологически адаптивной, что позволяет надежно защищать источники питьевого водоснабжения.

Использование сорбентов — один из ключевых способов локализации и удаления нефтяных загрязнений. Современные исследования показывают необходимость выбора высокоэффективных сорбентов, адаптированных к различным природным условиям и видам загрязнений, а также учитывающих биодеградацию и минимальное влияние на окружающую среду.

Список источников

[1] Цомбуева Б.В., Горяшкиева З.В., Щербакова Л.Ф. Метод очистки почвы от нефтяного загрязнения с помощью природных сорбентов. *Природные системы и ресурсы*, 2017, № 2, с. 19–24.

[2] Веприкова Е.В., Терещенко Е.А., Чесноков Н.В., Щипко М.Л., Кузнецов Б.Н. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей. *Журнал СФУ. Химия*, 2010, № 3, с. 285–304.

[3] Гамм Т.А., Смирнова Н.В., Гамм А.А. Влияние тяжелых нефтепродуктов на экологическое состояние почв и грунтовых вод после прекращения деятельности предприятия. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 2015, № 10, с. 368–370.

[4] Климов Е.С., Бузаева М.В. *Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод.* Ульяновск, УлГТУ, 2011, 201 с.

Investigation of the effectiveness of the use of modern sorbents for remediation of oil-contaminated waters and soils

Zhukova Yulia Mikhailovna dazhf1@mail.ru
Baranov Maxim Sergeevich bar_03@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

Pollution of soils and water bodies by oil and petroleum products is one of the most serious environmental threats, leading to degradation of natural ecosystems, reduced productivity of agricultural land and risks to public health. In this regard, this study provides a comprehensive analysis of scientific data on sorbents used to remove oil pollution from soil and water. The main types of sorption materials are considered, as well as their physicochemical properties that determine their effectiveness in various conditions.

Keywords: *petroleum products, soil pollution, water pollution, sorbents, organic sorbents, mineral sorbents, synthetic sorbents, sorbent efficiency, hydrophobicity, bioremediation, environmental purification, reclamation, environmental safety, absorption of petroleum products*

УДК 331.45

Организация охраны труда на металлургическом предприятии

Никулина Светлана Николаевна voinsveta579@mail.ru
Васильев Артем Сергеевич artemm245@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены опасные факторы, возникающие на металлургическом предприятии, и меры по их предотвращению. Представлены способы обеспечения безопасной работы на местах работы персонала. Были приведены необходимые требования для создания безопасных условий деятельности при взаимодействии с оборудованием в цеху обжига. В эти требования входят специальные технологические решения, правила поведения на рабочих местах и средства индивидуальной защиты рабочих. Данные сведения могут быть полезны в ознакомительных целях для тех, кто связан с охраной труда в тяжелой или цветной промышленности.

Ключевые слова: *металлы, металлургия, обработка, персонал, пыли, газы*

Получение чистого металла без примесей является одним из важных направлений в металлургической промышленности. Одним из ключевых этапов в таком производстве будет обработка металлургических концентратов. Данная технологическая операция выполняется за счет специальных печей кипящего слоя. Такие печи используются для обжига, сушки, кальцинации и остальных процессов. Принцип их действия основан на равномерной подаче нагретого воздуха или газа из подины печи, в результате которого засыпаемая шихта находится во взвешенном состоянии, в образовавшемся кипящем слое. При этом деятельность обрабатывающего цеха сопровождается образование различных побочных продуктов и эффектов, способных оказывать негативное влияние на человека. Вдобавок технология обработки металлов не полностью автоматизирована и требует присутствие рабочего персонала. Все это создает необходимость в обеспечении контроля за рабочей деятельностью [1].

Учитывая вышесказанное, целью данной темы будет предоставление актуальной информации об обеспечении безопасной работы на рабочих местах металлургического предприятия.

Задачами работы являются информирование об источниках вредных и опасных факторов на металлургических предприятиях, способах их предотвращения, а также меры по обеспечению безопасности сотрудников при работе с местным оборудованием.

К основным отклонениям условий труда от нормы относится [2]:

– высокая концентрация окислы серы в газах;

– большое количество пыли на площадках;

– высокая температура воздуха возле печи, циклонов и газоходов.

Источниками выделения пыли и газов являются: люки на циклонах, газоходах, котлах-утилизаторах; сливной порог для выгрузки огарка; щели на

сварных швах; уплотнения термопар и т. д. При нехватке средств тяги и засорении газоходных отверстий возникают очень сложные по газу условия работы в области установки печей кипящего слоя. Для серьезных улучшений санитарных условий труда важно обращать внимание на конструкцию дозирующих и запорных устройств различного назначения и места их установки. Необходимо усиливать и аспирационные отсосы от мест выгрузки огарка и пыли.

Снижение теплового излучения от горячих поверхностей достигается усилением внутренней теплоизоляции и затем установкой стальных экранов, обеспечивающих комфортный доступ для обслуживания и осмотров соответствующих мест обжиговой печи [2].

Пыль обжигового цеха содержит [2]:

– ZnO — 0,65 мг/м^3 при ПДК = 1,5 мг/м^3;

– SO_2 — 4 мг/м^3 при ПДК = 10 мг/м^3;

– Pb — 0,07 мг/м^3 при ПДК = 0,15 мг/м^3.

На рабочих площадках, лестницах и полах, на поверхности циклонов, газоходов и другого строительного и технического оборудования необходимо организовывать плановую уборку пыли с помощью пневматических вакуумных систем. В некоторых случаях оптимальной представляется гидравлическая уборка полов и площадок. Этими методами достигаются не только благоприятные условия труда, но и уменьшаются механические потери цветных металлов [3].

Специфические условия работы происходят в дутьевых камерах под подиной печи кипящего слоя. Чаще всего работа связана с заменой и ревизией воздухораспределительных сопел. Допускать проведение таких работ без основательной прочистки подины недопустимо. Особенно опасны работы в дутьевых камерах при нахождении в печи горячего материала [3].

Ремонт или чистку поверхностей или газоходов охлаждения газов при краткосрочных горячих остановках печи необходимо выполнять после относительно долгой холостой продувки кипящего слоя для максимального удаления сернистых газов и уменьшения температуры в печи и газоходном тракте. Порядок действия и распределение обязанностей среди персонала при возникновении опасных ситуаций при любых работах регламентируется стандартами и инструкциями предприятий [3].

В цехах завода цветной или тяжелой промышленности существует несколько мест, потенциально опасных для сотрудников. К таким местам можно отнести [4]:

– мостовые краны в складах;

– вращающиеся части дымососов и воздуходувов в соответствующих отделениях цеха;

– конвейерные галереи со складов концентрата;

– латки выпуска огарка из обжиговых печей;

– нагретая наружная поверхность обжиговых печей.

В таких цехах используются следующие рабочие напряжения [4]:

– 6 кВ — для питания двигателей дымососов и воздуходувов, а также повышающего трансформатора электрофильтров;

– 36 В — для питания местного освещения и переносных электроинструментов;

– 220 В — для питания электрического освещения;

– 380 В — энергопотребления остального оборудования.

Цеховые сети напряжения меньше 1000 В трех-, четырехфазные с заземленной централью. Питающие кабели и провода положены либо в металлических заземленных трубах, либо в кабельных каналах, либо на недоступной высоте. Поражение рабочего персонала электрическим током возможно при пробое изоляции проводов, токопроводящих частей и кабелей электрооборудования. Сотрудники могут получить термические ожоги при прикосновении к нагретой наружной поверхности печи [4].

Аварийные ситуации в цехе происходят из-за нарушения технологического процесса обжига и, в первую очередь, при отводе обжиговых газов, что может привести к их массовому выбросу в помещение цеха, а также к возгоранию электрооборудования в нем. Регулирование технологического процесса происходит дистанционно в большинстве случаев. В результате этого технический персонал практически не подвергается воздействию теплового излучения, источником которого являются нагретые до 60–80 °С внешние поверхности печей кипящего слоя. Ремонтный персонал (механики, электрики) получает небольшое тепловое облучение, когда выполняет периодические осмотры и мелкий ремонт соответствующего оборудования в обжиговом цехе. В воздух рабочей зоны цеха поступает сернистый ангидрид SO_2 в количество 4 мг/м^3 при ПДК = 10 мг/м^3 [5].

Сильные источники вибрации и шума находятся в дымососном и воздуходувном отделениях обжигового цеха. Значение шума в этих местах достигает 110–115 дБ при допустимом уровне в 85 дБ. Вибрация по вибрационной скорости равна 0,45·10 м/с и не превышает допустимых норм благодаря тому, что воздуходувы и дымососы установлены на мощные виброгасящие фундаменты [5].

Также в цехе присутствует источник вибрации и шума, когда осуществляется периодическое встряхивание стояков. В остальных местах цеха уровень вибрации и шума не превышает допустимых значений.

Источники инфразвука, ультразвука, ионизирующих излучений и электромагнитных полей в цеху обжига отсутствуют.

Для уменьшения несчастных случаев в процессе производства транспортеры огорожены от смотровых садков объемными решетчатыми ограждениями. Вращающиеся элементы дымососов, воздуходувов и другого технологического оборудования закрыты сплошными металлическими кожухами. Для защиты рабочих от удара энергетическим потоком в цехе применяют следующие технические меры защиты [6]:

– небольшие напряжения, использующиеся для электропитания оборудования и местного освещения при проведении ремонтных работ;

– периодическая профилактика и контроль повреждений изоляции электрооборудования;

– предотвращение прикосновения к токоведущим частям за счет расположения кабелей и проводов в металлических трубах, кабельных каналах и на недопустимой высоте;

– заземление оборудования.

Персонал, связанный с электротехническим оборудованием, имеет в наличии следующие изолирующие защитные средства [6]:

1) основные:

– в установках с напряжением более 1000 В — диэлектрический штамп, указатели напряжения, диэлектрические подставки, оперативные и изолирующие клещи;

– в установках с напряжением до 1000 В — индикаторы напряжения, диэлектрические перчатки, инструмент с изолирующими рукоятками;

2) дополнительные:

– диэлектрические коврики, боты.

Так как управление техническим процессом происходит дистанционно и нахождение людей в главных помещениях ограниченно по времени, то какие-либо технические и организационные меры защиты от теплового излучения не предусмотрено. Нормализация микроклимата основных помещений обжигового цеха зимой и летом осуществляется за счет общеобменной вентиляции [7].

Продукты обжига (пыли и газы) могут поступать в воздух цеха только в виде незначительных утечек из технологического оборудования. Большая часть продуктов улавливается в газоходной системе цеха. Обжиговые газы направляются в сернокислотный цех завода, а пыли, уловленные в циклонах, стояках и электрофильтрах — в вельц-цехе. Сотрудники пользуются такими индивидуальными средствами защиты от газов и пыли, как респираторы. Удобный и наиболее часто используемый для этих целей респиратор «лепесток». Для защиты от шума применяются шумозащитные наушники [7].

Подводя итоги, можно сказать, что была рассмотрена вся необходимая информация о принципах обеспечения безопасности персонала на рабочих местах металлургического предприятия. Проанализировав данные, можно сделать вывод, что систематические осмотры с занесением в специальные журналы состояния оборудования, технологии и конструкций являются главной профилактической работой по созданию безаварийной технологии обработки металлургических концентратов на соответствующих местах.

Список источников

[1] Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М. *Подготовка и обжиг сульфидных цинковых концентратов.* Красноярск, Сиб. Федерал. ун-т, 2011, 118 с.

[2] Мунц В.А., Филипповский Н.Ф., Баскаков А.П. Топка с кипящим слоем как объект регулирования. *Теплоэнергетика*, 1998, № 6, с. 15–19.

[3] Мунц В.А., Ивакина С.А., Терентьев В.М. Газообразование при обжиге цинкового концентрата в кипящем слое. *Цветные металлы*, 2017, № 2, с. 40–45.

[4] Притыкин Д.П. *Механическое оборудование заводов цветной металлургии.* Москва, Металлургия, 1988, 392 с.

[5] Набойченко С.С. *Процессы и аппараты цветной металлургии.* Екатеринбург, Уральский федеральный университет, 2013, 564 с.

[6] Старк С.Б. *Пылеулавливание и очистка газов в металлургии.* Москва, Металлургия, 1977, 320 с.

[7] Тимонин А.С. *Инженерно-экологический справочник.* Калуга, Изд-во Н. Бочкаревой, 2010, 211 с.

Organization of labor protection at a metallurgical enterprise

Nikulina Svetlana Nikolaevna Voinsveta579@mail.ru
Vasiliev Artem Sergeevich artemm245@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article examines hazardous factors that arise at a metallurgical plant and measures to prevent them. It also presents methods for ensuring safe work in personnel areas. The necessary requirements for creating safe working conditions when interacting with equipment in the firing shop are outlined. These requirements include special process solutions, workplace conduct rules, and personal protective equipment for workers. This information may be useful for those involved in occupational safety in the heavy or non-ferrous industries.

***Keywords**: metals, metallurgy, processing, personnel, dust, gases*

УДК 551.583

Тенденции изменения климатических факторов в Калужской области за последние 10 лет

Бахарева Екатерина Андреевна ekaterinabakhareva05@yandex.ru
Савина Виктория Владимировна metgassv@yandex.ru
Жукова Юлия Михайловна zjuliam@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены тенденции изменения климатических факторов в Калужской области за последние 10 лет. Представлен анализ динамики зимних осадков за период 2018–2024 гг. и среднегодовых температур за период 2015–2024 гг. Показано, что количество зимних осадков характеризуется значительной межгодовой изменчивостью без выраженного тренда, тогда как температурный режим демонстрирует устойчивую тенденцию к резкому потеплению, особенно выраженную в последние 3–4 года. Сделаны выводы об ускорении процессов регионального изменения климата, превышающих естественные колебания и связанных с глобальными антропогенными факторами.

Ключевые слова: *изменение климата, среднее количество осадков, температура, климатические тенденции, Калужская область*

Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью изучения региональных особенностей климатических изменений в условиях глобального потепления, поскольку локальные проявления этих процессов могут иметь существенные отличия от общемировых тенденций. Целью исследования является выявление и анализ тенденций изменения основных климатических факторов, в частности температуры воздуха и атмосферных осадков, на территории Калужской области за последнее десятилетие. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: проанализировать динамику среднемесячного количества осадков в зимний период за 2018–2024 гг., исследовать изменение среднегодовых температурных показателей за 2015–2024 гг., выявить особенности межгодовой изменчивости климатических параметров, оценить степень выраженности тенденций к потеплению в регионе и определить наличие аномальных периодов в изменении климатических характеристик.

Калужская область расположена в центральной части России и граничит с несколькими другими областями: на севере — с Московской, на северо-западе — со Смоленской, на востоке — с Тульской, а на юге — с Брянской и Орловской. Территория области занимает 29,777 км^2, вытянувшись более чем на 220 км как с севера на юг, так и с запада на восток.

Климат области — умеренно континентальный, с четко выраженными временами года: теплым и влажным летом и умеренно холодной зимой со стабильным снежным покровом. Средняя температура января составляет

— 10 °С, а июля — +18 °С. Годовое количество осадков колеблется от 450 до 650 мм, причем основная их часть (70 %) выпадает в весенний и осенний периоды [1].

Изучение динамики осадков в зимний период имеет важное значение для понимания региональных климатических изменений и их влияния на различные отрасли экономики, в том числе сельское хозяйство, энергетику и транспорт.

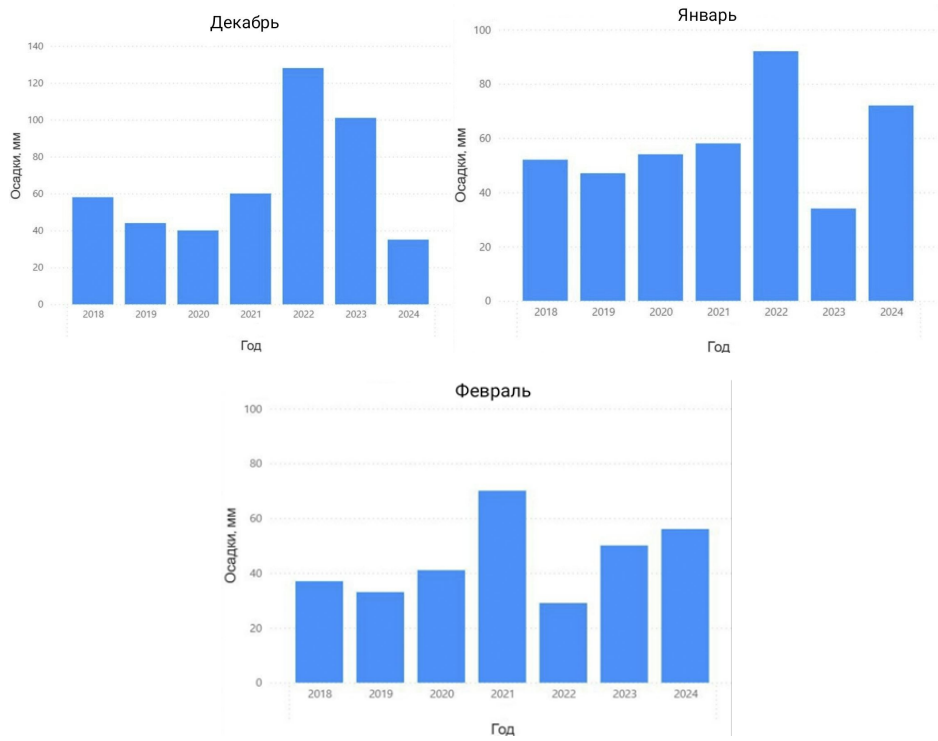


Рис. 1. Среднее количество выпавших осадков в зимний период 2018–2024

Анализ данных. Анализ динамики осадков в зимний период (декабрь–февраль) с 2018 по 2024 год показал отсутствие выраженного тренда увеличения или уменьшения суммарного количества осадков (рис. 1).

Наибольшая изменчивость наблюдается в декабре, где количество осадков варьирует в широком диапазоне, что может быть связано с неустойчивостью атмосферных процессов в начале зимнего периода. В этом месяце 2022 г. количество осадков было экстремально высоким (128 мм), а в 2024 г. — относительно низким (35 мм).

В феврале в целом отмечается наименьшее количество осадков по сравнению с другими зимними месяцами. Наибольшее количество осадков наблюдалось в 2021 г. (70 мм).

В январе количество осадков более стабильно, чем в декабре, но также наблюдаются колебания.

2022 г. является аномальным из-за экстремально высокого количества осадков в декабре, а 2019 — характеризуется относительно низким количеством осадков во всех трех месяцах [2, 3].

Таким образом, полученные результаты указывают на значительную межгодовую изменчивость осадков в зимний период, что может быть обусловлено влиянием различных климатических факторов, требующих дальнейшего исследования.

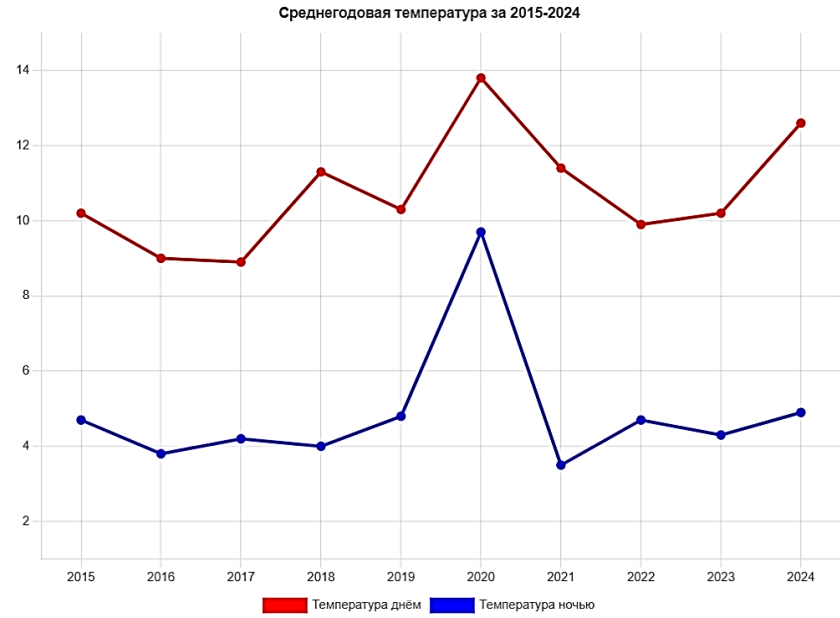


Рис. 2. Диаграмма среднегодовых температур 2015–2024 гг.

За период с 2015 по 2024 год наблюдается ярко выраженная тенденция к росту среднегодовых температур. Наиболее резкое повышение произошло в последние годы (2022–2024), когда температуры достигли своих максимальных значений за весь рассматриваемый период.

На протяжении всех лет сохраняется значительная и стабильная разница между средней температурой днем и ночью, составляющая примерно 5–7 °C. Это указывает на континентальные черты климата с характерными большими суточными колебаниями температур.

2015–2019 гг.: температуры демонстрировали относительную стабильность с незначительными годовыми колебаниями.

2020–2021 гг.: наметился четкий перелом тренда и начало периода устойчивого и резкого роста температур.

2022–2024 гг.: период аномально высоких температур, значительно превышающих средние показатели первой половины десятилетия.

Резкий рост температур в последние 3–4 года может быть индикатором ускорения процессов изменения климата в данном регионе. Такая динамика превышает естественные климатические колебания и, вероятно, связана с глобальными антропогенными факторами (рис. 2) [4].

Таким образом, диаграмма наглядно иллюстрирует не просто естественные колебания погоды, а устойчивую тенденцию к значительному потеплению в регионе, особенно усилившемуся в последние годы.

Список источников

[1] Васильев К.С., Петров И.А. Исследование современных климатических тенденций в Центральном федеральном округе. *Метеорология и гидрология*, 2023, № 5, с. 45–58.

[2] *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* Москва, Росгидромет, 2022.

[3] *Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Калужской области.* Калуга, Министерство природных ресурсов и экологии Калужской области.

[4] Семенова Е.Н. *Методы статистического анализа в климатологии.* Санкт-Петербург, Изд-во РГГМУ, 2021, 215 с.

Trends in climate change in the Kaluga Region over the past 10 years

Bakhareva Ekaterina Andreevna ekaterinabakhareva05@yandex.ru
Savina Victoria Vladimirovna metgassv@yandex.ru
Zhukova Yulia Mikhailovna zjuliam@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article examines the trends of climate change in the Kaluga region over the past 10 years. The analysis of the dynamics of winter precipitation for the period 2018-2024 and average annual temperatures for the period 2015–2024 is presented. It is shown that the amount of winter precipitation is characterized by significant interannual variability without a pronounced trend, while the temperature regime shows a steady trend towards a sharp warming, especially pronounced in the last 3–4 years. Conclusions are drawn about the acceleration of regional climate change processes exceeding natural fluctuations and related to global anthropogenic factors.

Keywords: *climate change, average precipitation, temperature, climatic trends, Kaluga region*

УДК 628.3

Анализ динамики объемов и структуры сброса сточных вод в Калужской области

Зубарева Анжелика Алексеевна anzhelika.zubareva@yandex.ru
Раздобреева Полина Ивановна polinarazd123@gmail.com
Жукова Юлия Михайловна zjuliam@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен анализ объема сброса сточных вод в Калужской области за период 2012–2024 гг. на основе официальных данных. Выявлены основные тенденции в изменении объемов и качества сточных вод, включая сокращение доли загрязненных стоков, рост нормативно очищенных вод и улучшение работы очистных сооружений после 2017 г. Отмечены проблемы, такие как высокая антропогенная нагрузка, на водные объекты и отсутствие данных за 2019–2022 гг. Для достижения целей устойчивого развития региона авторы подчеркивают необходимость продолжения модернизации инфраструктуры и усиления системы экологического мониторинга, что позволит минимизировать негативное воздействие на водные ресурсы.

Ключевые слова: *сточные воды, водоотведение, Калужская область, очистка сточных вод, экологический мониторинг, антропогенная нагрузка, загрязненные стоки, нормативно очищенные воды*

Водные ресурсы являются фундаментальным компонентом устойчивого развития любого региона, напрямую влияя на экологическую безопасность, санитарно-эпидемиологическое благополучие и социально-экономическое состояние территории. В условиях растущей антропогенной нагрузки, включающей промышленную деятельность, развитие городской инфраструктуры и сельскохозяйственное производство, качество и количество водных объектов подвергается значительному воздействию. Недостаточно очищенные или вовсе неочищенные стоки становятся источником загрязнения поверхностных и подземных вод, что ведет к деградации водной экосистемы, снижению биоразнообразия и создает прямые риски для здоровья населения.

Особую актуальность проблема управления сточными водами приобретает на региональном уровне, где специфика экономики, структура коммунального хозяйства и состояние инфраструктуры формируют определенные вызовы. Калужская область, являясь активно развивающимся промышленным регионом Центральной России с растущим числом индустриальных парков и стабильным демографическим ростом, представляет собой репрезентативный пример для анализа подобных проблем. Мониторинг и всесторонний анализ динамики сброса сточных вод в регионе являются не только индикатором экологического благополучия, но и важным инструментом для оценки эффективности проводимой природоохранной политики региона и работы очистных сооружений (см. таблицу, рис. 1–6).

Данная работа посвящена анализу динамики и структуры сброса сточных вод в Калужской области за период с 2012 по 2024 год. В исследовании использованы официальные данные, чтобы получить точную картину происходящих изменений и выявить основные тенденции в области водоотведения региона [1].

Динамика изменения водохозяйственной деятельности

Год	Сброшено сточных вод, всего (млн м³)	Из них загрязненных в том числе (млн м³)	Без очистки (млн м³)	Недостаточно очищенных (млн м³)	Нормативно-очищенных (млн м³)	Нормативно-чистых без очистки (млн м³)
2012	91,855	82,855	6,813	77,043	5,845	2,156
2013	97,13	93,02	6,21	86,79	4,04	0,08
2014	92,65	92,57	6,47	83,07	3,02	0,09
2015	90,84	90,76	6,31	79,88	1,38	0,9
2016	90,14	89,82	6,51	77,5	2,22	0,32
2017	77,93	76,10	0,47	71,44	4,19	0,63
2018	80,21	71,49	0,62	70,87	8,23	0,49
2019	83,16	–	–	–	–	–
2020	116,7	–	–	–	–	–
2021	116,685	–	–	–	–	–
2022	87,31	–	–	–	–	–
2023	88,47	73,0	0,48	72,52	14,78	0,69
2024	86,09	73,6	0,47	73,14	11,76	0,47

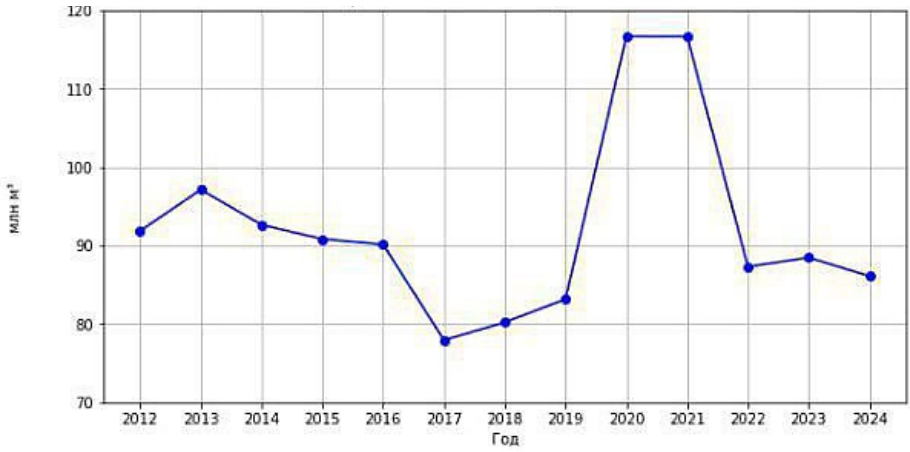


Рис. 1. Объем сброшенных сточных вод (2012–2024 гг.)

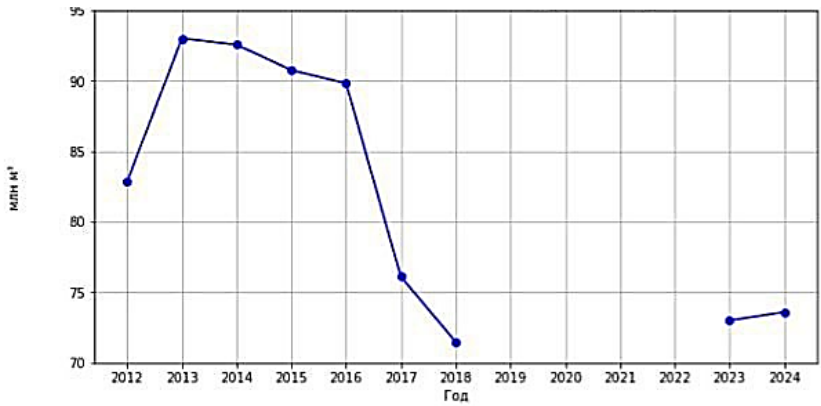


Рис. 2. Объем загрязненных сточных вод (2012–2024 гг.)

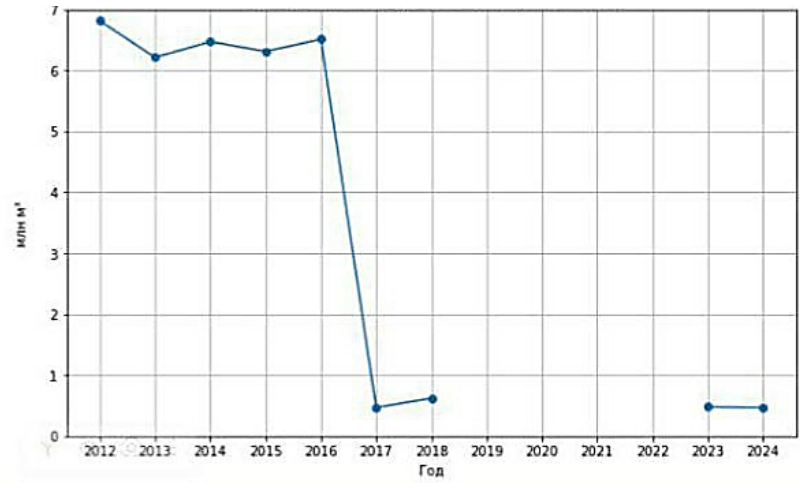


Рис. 3. Объем сточных вод без очистки (2012–2024 гг.)

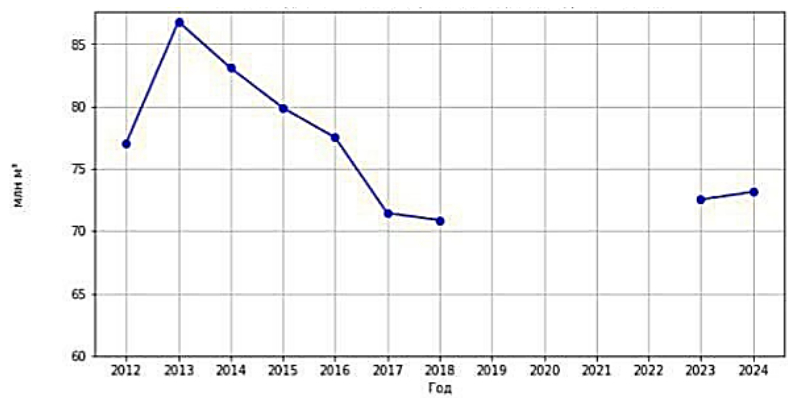


Рис. 4. Объем недостаточно очищенных сточных вод (2012–2024 гг.)

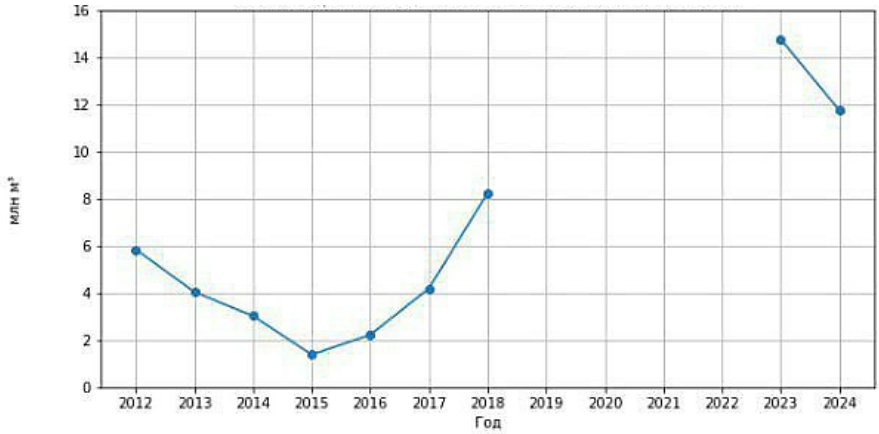


Рис. 5. Объем нормативно-очищенных сточных вод (2012–2024 гг.)

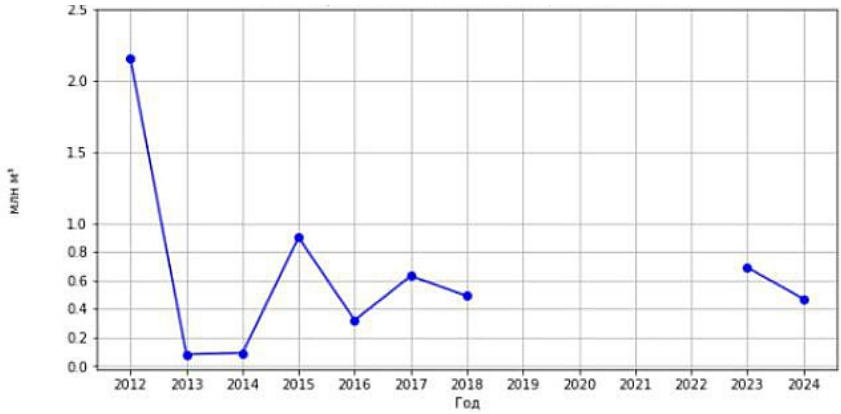


Рис. 6. Объем нормативно-чистых сточных вод (2012–2024 гг.)

Проведенный анализ динамики и структуры сброса сточных вод в Калужской области за период с 2012 по 2024 гг. позволил выявить ряд ключевых тенденций (рис. 1, 2). Начиная с 2017 года, в регионе наблюдается кардинальное улучшение качества водоотведения, выраженное в резком сокращении объемов сброса сточных вод без очистки — с 6–7 млн м³ до стабильных значений около 0,5 млн м³ (рис. 3). Это говорит о том, что серьезные нарушения в работе очистных сооружений стали устранять более эффективно [2].

Подтверждена положительная динамика в структуре загрязненных стоков: наряду со снижением объемов недостаточно очищенных вод отмечается значительный рост доли нормативно очищенных вод, достигший пиковых значений в 2023–2024 гг. (рис. 4, 5). Это свидетельствует о внедрении более эффективных технологий и улучшении работы очистных сооружений. Можно сказать, что вода после очистки теперь чаще соответствует установленным нормативам [3].

Несмотря на улучшение качества очистки, общие объемы сброса остаются значительными, что указывает на сохранение высокой антропогенной нагрузки на водные объекты. Промышленность и жилищно-коммунальное хозяйство по-прежнему сбрасывают большой объем стоков, что создает постоянную нагрузку на экосистему.

Серьезной проблемой являются пробелы в системе мониторинга, в частности отсутствие детализированных данных за 2019–2022 гг., что затрудняет непрерывный анализ и подчеркивает необходимость повышения прозрачности экологического учета.

Таким образом, в Калужской области наметились выраженные положительные сдвиги в сфере водоотведения, особенно в качестве очистки (рис. 6). Однако для снижения общей нагрузки на водные объекты важно и дальше модернизировать инфраструктуру, обновлять очистные сооружения и улучшать систему контроля над сбросами [4].

Список источников

[1] *Водный кодекс Российской Федерации* (ред. от 01.07.2024). URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения 03.06.2006).

[2] *О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации за 2012–2023 гг.* Государственный доклад. URL: https://www.mnr.gov.ru/ (дата обращения 07.11.2025).

[3] *Доклад об экологической ситуации в Калужской области.* URL: https://admoblkaluga.ru/ (дата обращения 28.10.2025).

[4] СанПиН 1.2.3685-21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания*. URL: https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf (дата обращения 28.01.2021).

Analysis of the dynamics of the volume and structure of wastewater discharge in the Kaluga region

Zubareva Angelika Alekseevna anzhelika.zubareva@yandex.ru
Razdobreeva Polina Ivanovna polinarazd123@gmail.com
Zhukova Yulia Mikhailovna zjuliam@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The volume of wastewater discharge in the Kaluga Region for the period 2012–2024 was analyzed based on official data. The main trends in changes in the volume and quality of wastewater have been identified, including a reduction in the proportion of polluted wastewater, an increase in standard treated water, and an improvement in the operation of wastewater treatment plants after 2017. Problems such as the high anthropogenic load on water bodies and the lack of data for 2019–2022 were noted.

Keywords: *wastewater, sanitation, Kaluga region, wastewater treatment, environmental monitoring, anthropogenic load, polluted effluents, normatively treated waters*

Секция 7. Современные технологии в наземных транспортно-технологических системах. Прикладные проблемы механики

УДК 629.33

Тормозная система в соответствии с техническим регламентом Формулы-4 2025

Васильев Алексей Александрович vasilevaa3@student.bmstu.ru
Плахов Сергей Александрович sa.plahov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены ключевые технические стандарты и требования к тормозным системам спортивных автомобилей, основанные на действующих регламентах. Особое внимание уделено параметрам контуров тормозной системы, конструкции тормозных дисков и суппортов, а также ограничениям в области охлаждения и модульности системы. Анализ этих требований позволяет определить основные направления совершенствования тормозных систем с целью повышения их надежности, эффективности и безопасности, а также технических положений, регулирующих проектирование и эксплуатацию тормозных систем в автоспортивных условиях

Ключевые слова: *Формула-4, болид, тормозная система*

Тормозная система является одним из наиболее ответственных элементов спортивных автомобилей, обеспечивающих безопасность и управляемость. Современные регламенты предъявляют строгие требования к конструкции и функционированию тормозных механизмов, что обусловлено необходимостью обеспечения высокой надежности при экстремальных условиях эксплуатации.

Требования к цепям тормозной системы следующие. Все автомобили должны оснащаться тормозной системой, состоящей минимум из двух отдельных контуров, управляемых одной педалью. Такой дизайн обеспечивает резервирование работы тормозной системы: при утечке или поломке одного контура тормозной системы сохраняют эффективность на как минимум двух колесах. Этот принцип повышает безопасность, снижая риск полной потери тормозного усилия. Это регулирует узел управления (рис. 1) [1–3].

Узел управления отвечает за передачу усилия с педали тормоза в гидравлическое давление, которое регулирует торможение колес. Он обеспечивает точное распределение тормозного усилия между осями для стабильного и эффективного замедления автомобиля.

Тормозные диски (рис. 2) должны быть изготовлены из специальных материалов на основе различных металлов и сплавов, что обеспечивает их долговечность и хороший теплоотвод. Открытые (просверленные) диски запрещены, что связано с возможным ослаблением конструкции и риском разрушения. Важными параметрами являются вентилируемость и минимальная толщина диска, составляющая 18 мм, что способствует эффективному теплоотводу. Вес нового тормозного диска должен быть не менее 2450 г. Вес нового тормозного диска в сборе не должен быть менее 2900 г, что обеспечивает достаточную массу для теплового и механического сопротивления [1, 4].

Ограничение по типам дисков — использование только одного типа для всех колес — способствует унификации и снижению риска ошибок монтажа.

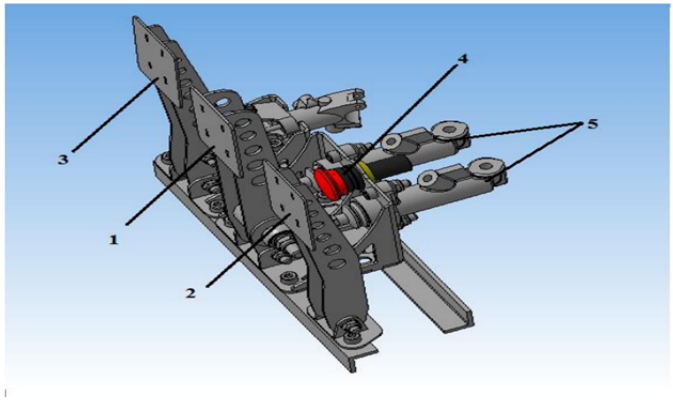


Рис. 1. Узел управления:
1 — педаль тормоза; *2* — педаль газа; *3* — педаль сцепления; *4* — выключатель; *5* — главные тормозные цилиндры

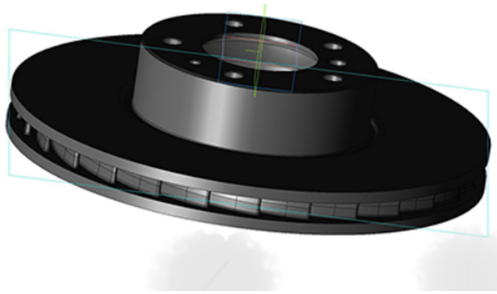


Рис. 2. Тормозной диск вентилируемый

Тормозные механизмы с неподвижном суппортом (рис. 3) должны быть изготовлены из алюминиевых материалов с модулем упругости не выше 80 ГПа, что обеспечивает баланс между прочностью и легкостью конструкции. Передние суппорты должны иметь четыре поршня, задние — от двух до четырех, что позволяет регулировать тормозное усилие и оптимизировать распределение тормозных сил. Минимальный вес суппорта — 1200 г [1–3].

Запрещено использование воздуховодов для охлаждения тормозных механизмов и любых других деталей, что может быть обусловлено желанием ограничить влияние внешних факторов на тепловой режим. Аналогично, жидкостное охлаждение тормозной системы полностью запрещено, что упрощает конструкцию и повышает надежность [1].

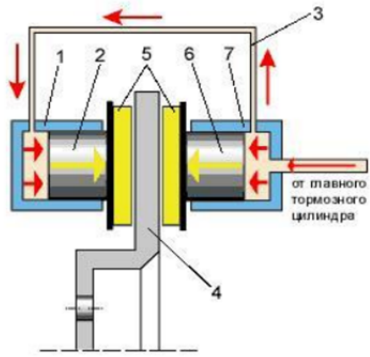


Рис. 3. Схема работы тормозного механизма с неподвижным суппортом:
1 — рабочий цилиндр; *2* — поршень; *3* — соединительная трубка; *4* — тормозной диск; *5* — тормозные колодки; *6* — поршень; *7* — рабочий цилиндр

Любые устройства, обеспечивающие нелинейное давление или модуляцию тормозного усилия, запрещены, что делает тормозную систему линейной и предсказуемой. Нормальная сила давления на тормозных колодках должна зависеть только от тормозного усилия, что способствует точному управлению тормозным управлением. Для всех колес допускается использование только одного типа тормозных колодок, причем могут быть выбраны максимум три группы типов для сезона, что обеспечивает стандартизацию и контроль качества [4].

Заключение. Анализ регламентных требований показывает, что проектирование тормозных систем в автоспорте должно учитывать баланс между надежностью, тепловой устойчивостью и управляемостью. Требования к тормозной системе спортивных автомобилей направлены на обеспечение высокой безопасности и надежности при экстремальных условиях. Использование двухконтурной системы с резервированием, строгие параметры материалов и конструкции дисков и суппортов способны обеспечить долговечность и эффективное теплоотведение без дополнительных охлаждающих систем. Запрет на модуляцию давления и ограничение типов тормозных колодок обеспечивают предсказуемость и стандартизацию работы тормозных механизмов. В сумме это способствует стабильному и безопасному управлению автомобилем в гонках, снижая риски отказов и повышая точность торможения.

Список источников

[1] *2025 FIA Formula 4 — Technical regulations.* URL: https://api.fia.com/sites/default/files/2025_fia_formula_4_technical_regulations_-_issue_2_-_2024.12.11.pdf (accessed 15.10.2025).

[2] *Хаммилл Дэс. Подвеска и тормоза. Как построить и модифицировать спортивный автомобиль.* URL: https://gaz24.ru/c117592/wp-content/uploads/2013/01/Hammill_Podveska_i_tormoza.pdf (дата обращения 15.10.2025).

[3] Пантелеев Л.Е. *Исследование и разработка технических решений.* URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/8044/1/%D0%9F%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B5%D0%B2%20%D0%9B.%D0%95._%D0%90%D0%A2-1301.pdf (дата обращения 16.10.2025).

[4] *Drive2.ru. Автомобильная социальная сеть.* URL: https://www.drive2.ru/b/527180642220245723/ (дата обращения 16.10.2025).

The car's braking system in accordance with the Formula 4 2025 technical regulations

Vasiliev Alexey Alexandrovich vasilevaa3@student.bmstu.ru
Plahov Sergey Alexandrovich sa.plahov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article examines the key technical standards and requirements for braking systems in sports cars based on current regulations. Special attention is paid to the parameters of the brake system circuits, the design of the brake discs and calipers, as well as the limitations in the field of cooling and modularity of the system. The analysis of these requirements makes it possible to identify the main areas of improvement of braking systems in order to increase their reliability, efficiency and safety.

Keywords: *Formula 4, car, brake system*

УДК 629.3.01

Формирование стратегии управления мощностью топливного элемента для выбора параметров энергетической установки водородного транспортного средства

Соловьев Михаил Алексеевич solovyevma@bmstu.ru
Бутарович Дмитрий Олегович buta73@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены основные подходы к выбору параметров энергетической установки (ЭУ) пассажирского транспорта, включающей в себя водородный топливный элемент (ТЭ), тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ) и систему хранения водорода. Представлены методы формирования стратегий управления мощностью ТЭ. Описан принцип стратегии управления, основанной на методе динамического программирования и стратегии поддержания заряда. Произведено математическое моделирование движения транспортного средства с применением указанных выше стратегий, произведено сравнение расхода водорода. Сделаны выводы об их применимости для осуществления выбора параметров энергетической установки.

Ключевые слова: *водородный транспорт, гибридная энергетическая установка, топливный элемент, запас хода, стратегия управления, выбор параметров*

Глобальный переход к низкоуглеродной экономике стимулирует развитие электротранспорта. Одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик которого является использование водородного топливного элемента (ТЭ) в качестве электрохимического генератора (ЭХГ). Ключевым преимуществом водородных топливных элементов является высокая удельная энергия, что позволяет увеличивает запас хода и грузоподъемность транспортных средств (ТС). Актуальность работы обусловлена необходимостью выбора параметров энергетических установок (ЭУ) гибридных ТС на основе ТЭ.

В настоящее время большинство конструкций водородных ТС являются гибридными и включают в свой состав тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ) и топливный элемент. Батареи необходимы для хранения части энергии, используемой в условиях высокой нагрузки и рекуперации [1]. ТЭ используется в качестве основного или дополнительного источника энергии. Так как на борту два источника энергии, появляется необходимость в выборе мощности работы каждого из них, за это отвечает система распределения энергии (EMS). И требует формирования отдельного алгоритма управления.

Существуют различные типы топливных элементов. В данной работе рассмотрено применение топливного элемента с протонообменной мембраной, как наиболее распространенного в области колесных ТС [2]. Принцип работы таких ТЭ основан на реакции окисления водорода $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ и свойствах полупроницаемой мембраны, которая пропускает протоны H^+ и блокирует поток электронов e^-. Водород подается на анод (с одной сторо-

ны мембраны) и под воздействием катализатора разделяется на протоны и электроны: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$. На катод подается кислород O_2 из окружающей среды. Протоны H^+ и электроны e^- с анода стремятся вступить в реакцию с кислородом. Возникает электродный потенциал, под воздействием которого протоны H^+ проходят через мембрану на катод, а электроны e^- проходят через внешнюю цепь, создавая электрический ток. На катодной стороне реакция завершается $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ с образованием воды и тепла.

Ключевыми характеристиками ТЭ с точки зрения проектирования ТС являются: поляризационная кривая (зависимость напряжения от вырабатываемого тока), зависимость мощности ТЭ от вырабатываемой силы тока, минимальная мощность работы ТЭ, скорость изменения мощности ТЭ.

Из анализа литературы можно выделить два основных подхода при выборе параметров ЭУ для водородных ТС.

Первый, когда моделирование движения не производится, а составляются аналитические зависимости, устанавливающие связь между параметрами ТС (массы, максимальной скорости и ускорения, запас хода при постоянной скорости, расход водорода на 100 км) и параметрами ЭУ (мощность ТЭ, емкость ТАБ, запас перевозимого водорода). Используя полученные зависимости осуществляется выбор ЭУ [3]. Существенным недостатком такого подхода является отсутствие учета переменных режимов нагружения, характерных для колесных ТС.

При втором подходе выбор параметров осуществляется с учетом потребления на маршруте, рассчитанном для исходного ТС. Преимущественно при использовании второго подхода осуществляется совместная оптимизация параметров ЭУ и стратегии управления. Так, в исследовании [4] происходит перебор различных конфигураций ТЭ, ТАБ и суперконденсаторов при этом для каждой конфигурации осуществляется оптимизация стратегии управления распределением энергии по принципу максимума Понтрягина. При этом мощность, потребляемая на маршруте, рассчитывается один раз перед постановкой задачи. Недостатком является отсутствие влияния массы компонентов ЭУ (включая баллоны) на мощность, требуемую для движения по маршруту. Хотя масса ЭУ может достигать 15 % от снаряженной массы ТС (измерение для городского водородного автобуса ЛиАЗ полной массой 18 т).

Рассмотрим применение различных стратегий управления для сравнения ТС с различными параметрами водородной ЭУ. На рис. 1 приведена классификация методов формирования стратегий управления [5].

Стратегии управления распределением энергии можно разделить на три группы: основанные на правилах, основанные на оптимизации и основанные на V2X технологиях.

Стратегии первой группы наиболее просты в реализации в реальном времени (на автомобиле), так как основаны на предопределенных правилах. Могут быть сформулированы как в виде детерминированных правил, так и с помощью нечеткой логики. Недостатком является необходимость новой

настройки при изменении мощности ТЭ или емкости ТАБ и меньшая эффективность по сравнению с другими стратегиями.



Рис. 1. Классификация методов формирования стратегий управления распределением энергии ЭУ

Стратегии второй группы основаны на различных методах оптимизации, их делят на три подгруппы. Методы глобальной оптимизации требуют полной информации о маршруте, с одной стороны, это недостаток, так как это исключает их применение на реальных ТС, с другой стороны, они позволяют вычислить оптимальный закон управления для известного маршрута для дальнейшей оценки и настройки других разрабатываемых стратегий управления. Стратегии управления, основанные на оптимизации в реальном времени, требуют информацию только о текущем и прошлых состояниях ТС и реализуемы на ТС. Третья подгруппа — стратегии, основанные на машинном обучении. С точки зрения сравнения различных конфигураций ЭУ оптимизация в реальном времени и машинное обучение имеют те же недостатки, что и стратегии, основанные на правилах.

Третья группа стратегий — основанная на использовании интеллектуальных транспортных систем. Они сосредоточены на использовании данных о дорожном движении и инфраструктуре в режиме реального времени для оптимизации энергопотребления. Интегрируя информацию от светофоров, дорожных датчиков, камер и других интеллектуальных систем, система распределения энергии может динамически регулировать энергопотребление автомобиля, чтобы повысить общую эффективность.

Основным способом сравнения энергоэффективности ЭУ является моделирование движения с сохранением первоначального заряда батареи, т. е. в начальной и конечной точке маршрута заряд батареи должен быть одинаков. Это необходимо для более точной оценки энергоэффективности ТС.

В таком случае затраченную энергию возможно оценить по расходу водорода. И подбирать параметры ЭУ, опираясь на этот показатель. Исходя из описанного метод формирования стратегии управления мощностью ТЭ должен отвечать следующим требованиям:

– должно обеспечиваться равенство уровня заряда в начале и в конце маршрута ($SOC_0 = SOC_{end}$);

– должен обеспечиваться учет ограничений, накладываемых на работу ЭУ: допустимая скорость изменения мощности ТЭ, минимальная и максимальная мощность ТЭ, отсутствие превышения токов заряда и разряда ТАБ;

– отсутствие необходимости повторной настройки стратегии при изменении максимальной мощности ТЭ, емкости ТАБ и массы перевозимого баллона.

Данным требованиям отвечает метод динамического программирования. На рис. 2 показано его сравнение со стратегией поддержания заряда. Из результатов видно, что удается достичь экономии водорода ≈ 3,6 %, несмотря на более жесткие ограничения (порог минимальной мощности работы ТЭ, ограничение на скорость изменения мощности ТЭ).

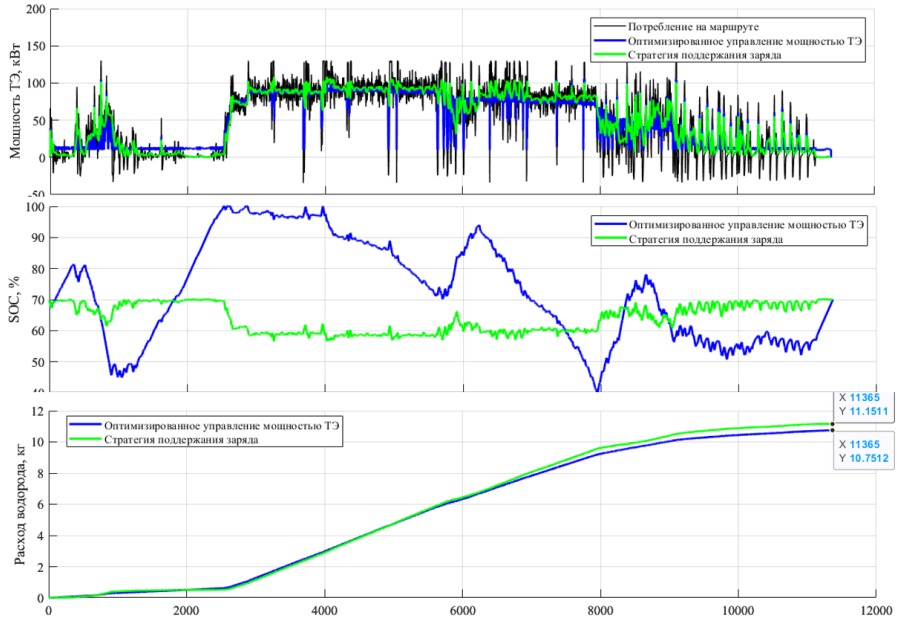


Рис. 2. Результаты моделирования движения с использованием ДП и стратегии поддержания заряда

Таким образом, предлагается следующий метод выбора параметров ЭУ (рис. 3) особенностью которого является учет влияния массы ЭУ на мощность, потребляемую на маршруте и универсальность для сравнения различных ЭУ.

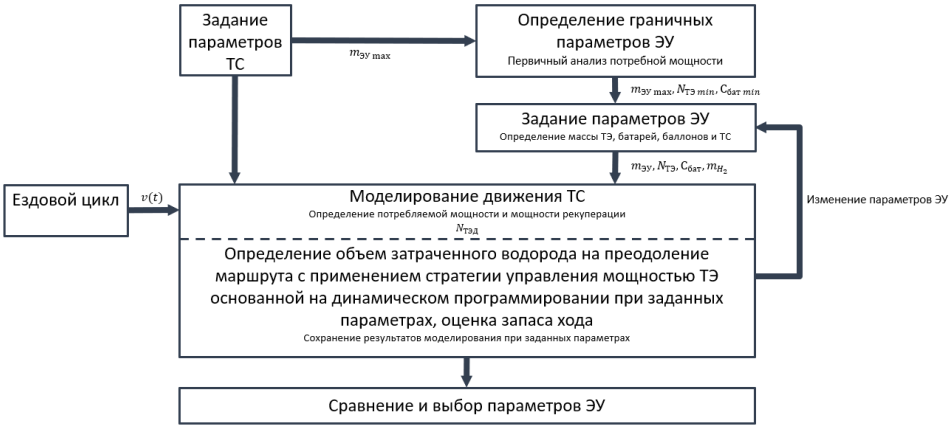


Рис. 3. Блок-схема метода выбора параметров ЭУ

Заключение. В работе был кратко рассмотрен принцип работы водородных ТС, классификация методов формирования стратегии управления мощностью ТЭ и методы выбора параметров ЭУ. Были сформулированы требования к методу формирования стратегии управления с точки зрения задачи выбора параметров ЭУ. Выбран метод динамического программирования, как наиболее подходящий для решения данной задачи. Произведено сравнение выбранного метода с методом, основанном на поддержании заряда. Сформирована блок-схема метода выбора рациональных параметров ЭУ для водородного ТС.

Список источников

[1] Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Маликов Р.Р., Климов А.В., Рябцев Ф.А. Об аспектах проектирования электрифицированных транспортных средств с комбинированной энергоустановкой на основе топливных элементов. *Труды НАМИ*, 2021, № 1, с. 47–58.

[2] Fakherdinne O., Gharbia Y., Farrokhi Derakhshandeh J., Amer A.M. Challenges and solutions of hydrogen fuel cells in transportation systems: a review and prospects. *World Electric Vehicle Journal*, 2023, vol. 14(6), art. no. 156. https://doi.org/10.3390/wevj14060156

[3] Liangfei X., Minggao O., Jianqiu L., Fuyuan Y., Languang L., Jianfeng H. Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost. *Applied Energy*, 2013, vol. 103, 2013, pp. 477–487. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.010

[4] Hongliang J., Liangfei X., Jianqiu L., Zunyan H., Minggao O. Energy management and component sizing for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid powertrain based on two-dimensional optimization algorithms. *Energy*, 2019, vol. 177, pp. 386–396. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.110

[5] Farajpour Y., Lotfy A., Chaoui H., Kelouwani S. Cutting-Edge EMS Technologies for EVs and HEVs: recent developments and future directions. *IEEE Access*, 2025. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3582527

Formation of a fuel cell power management strategy for selecting parameters of a hydrogen vehicle power plant

Solovyov Mihail Alekseevich solovyevma@bmstu.ru
Butarovich Dmitriy Olegovich buta73@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The main approaches to selecting the parameters of a power plant for passenger transport, which includes a hydrogen fuel cell, traction batteries, and a hydrogen storage system, are considered. Methods for formulating fuel cell power management strategies are presented. The principle of a management strategy based on the dynamic programming method and the charge-sustaining strategy is described. Mathematical modeling of the vehicle's movement using the aforementioned strategies was carried out, and a comparison of hydrogen consumption was performed. Conclusions are drawn regarding their applicability to the task of selecting power plant parameters.

Keywords: *hydrogen transport, hybrid power plant, fuel cell, range, management strategy, parameter selection*

УДК 62-713.5

Определение потребной мощности нагревателя системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи электрического мини-погрузчика в зимних условиях

Бруй Даниил Андреевич bruy.d@bmstu.ru
Бутарович Дмитрий Олегович buta73@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлена мощность потребления нагревателя системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи электрического мини-погрузчика в зимних условиях при типовых режимам эксплуатации при помощи математического моделирования в среде MATLAB. По результатам работы сделаны выводы о наиболее тяжелых режимах эксплуатации мини-погрузчика с точки зрения энергопотребления нагревателя системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи

Ключевые слова: *мини-погрузчик, система термостатирования, тяговая аккумуляторная батарея, нагреватель, режимы эксплуатации, зимние условия*

В работе рассматривается способ оценки мощности работы нагревателя системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи электрического мини-погрузчика, выполняющего коммунальные задачи, для которых были определены типовые режимы эксплуатации, в зимних условиях. Оценка мощности нагревателя осуществляется при помощи математического моделирования движения электрического мини-погрузчика, работы тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) и системы термостатирования (ТМС). Данный способ позволит оценить мощность работы нагревателя коммунальной техники типа мини-погрузчика в зимних условиях при различных температурах окружающего воздуха на этапе проектирования.

В условиях стремительного развития электромобильной индустрии [1], в том числе с государственным стимулированием роста рынка [2], и увеличения спроса на экологически чистые транспортные средства, вопросы эффективности и надежности ТАБ становятся все более актуальными. Данная тенденция справедлива и для рынка специальной техники, предназначенной для выполнения коммунальных задач в городских условиях (чистка снега, уборка мусора с тротуаров и дорог). Одним из основных факторов, влияющих на долговечность работы ТАБ электрических транспортных средств, является обеспечение работы ТАБ в оптимальных температурных условиях [3–5]. Оптимальную температуру работы ТАБ обеспечивает ТМС, затрачивающая энергию для обслуживания батареи [6]. Однако доподлинно неизвестно, с какой мощностью требуется подогрев ТАБ, в особенности для специальной техники типа мини-погрузчика, которая имеет существенное энергопотребление со стороны гидравлического оборудования.

Цель работы: определение мощности нагревателя системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи, необходимой для эксплуатации электрического мини-погрузчика в зимних условиях.

Методология и методы: математическое моделирование системы «мини-погрузчик — батарея — термостатирование» в среде MATLAB для проведения численных экспериментов с целью определения мощности потребления нагревателя ТМС при различных типовых режимах эксплуатации электрического мини-погрузчика (МЭП).

Результаты и научная новизна: представлены результаты моделирования работы системы «мини-погрузчик — батарея — термостатирование», типовые нагрузочные режимы эксплуатации мини-погрузчика в зимних условиях, определение КПД ТАБ электрического мини-погрузчика, определение мощности работы нагревателя при различных типовых режимах эксплуатации МЭП с учетом саморазогрева ТАБ. Полученные результаты раскрывают фактическую мощность нагревателя в процессе эксплуатации мини-погрузчика в зимних условиях.

Практическая значимость: полученные результаты в будущем позволят осуществлять подбор нагревателя ТМС с требуемой мощностью работы, соответствующей реальной потребностью в рамках поддержания оптимальной температуры ТАБ электрических мини-погрузчиков.

Математическая модель системы «мини-погрузчик-батарея-термостатирование» состоит из соответствующих трех частей. Математические модели ТАБ и ТМС реализованы при помощи модуля Simscape в MATLAB Simulink. Особенностью математической модели батареи заключается в том, что она учитывает чистое омическое сопротивление и первое поляризационное сопротивление батареи, что позволяет учитывать явления саморазогрева ТАБ. Учет саморазогрева значительно влияет на требуемую мощность работы нагревателя, так как часть энергии для обогрева ТАБ будет обеспечиваться при помощи работы самой ТАБ. Значения сопротивлений тяговой аккумуляторной батареи определены согласно [7].

Общий вид математической модели системы «мини-погрузчик — батарея — термостатирование» представлен на рис. 1.

Режимы эксплуатации, являющиеся типовыми для МЭП в зимних условиях, являются уборка снега, подметание, погрузка мусора, ландшафтные работы и перемещение в городских условиях. На рис. 2 представлен один из типовых режимов эксплуатации «подметание».

Используя данный типовой режим эксплуатации в рамках математической модели «мини-погрузчик — батарея — термостатирование» были установлены параметры, представленные в таблице.

Аналогичным образом проводится оценка мощности работы нагревателя по остальным типовым режимам эксплуатации МЭП.

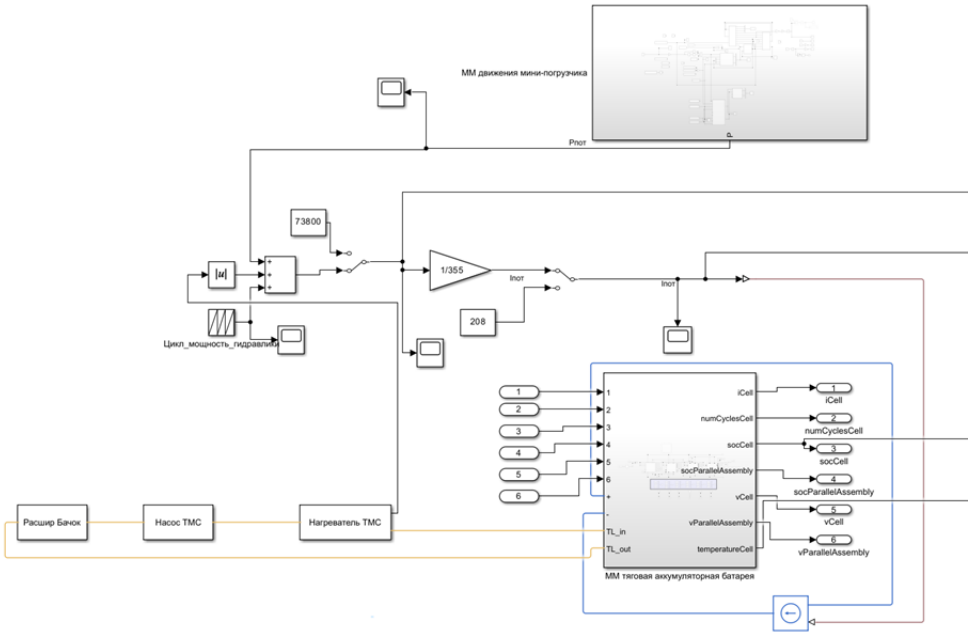


Рис. 1. Общий вид математической модели системы «мини-погрузчик–батарея–термостатирование»

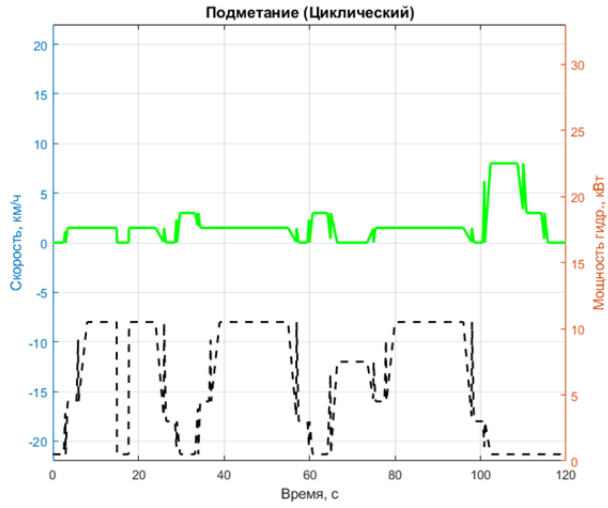


Рис. 2. Режим эксплуатации «подметание»

Таким образом, разработанная математическая модель системы «мини-погрузчик — батарея — термостатирование» позволяет оценивать затрачиваемую мощность на обогрев ТАБ и осуществлять подбор нагревателя ТМС,

обеспечивающего оптимальную температуру работы ТАБ при работе МЭП в рамках типовых режимов эксплуатации.

Результаты режима эксплуатации «подметание» при температуре окружающей среды –20 °С (поддержание температуры ТАБ)

Параметр	Значение, Вт
Средняя мощность нагревателя	581
Средняя мощность саморазогрева	980

Список источников

[1] Фасхиев Х.А. Рынок электромобилей в России. *Автомобильная промышленность*, 2020, с. 31–36.

[2] Павлова А.С., Маркичев В.А., Фамина Н.А, Государственное стимулирование роста рынка электромобилей. *Аллея науки*, 2024, с. 77–81.

[3] Tran M.-K. A comprehensive review of lithium-ion battery thermal management system. *Journal of Power Sources*, 2022, vol. 509, pp. 230–247.

[4] Li J., Zeng Sh., Wu W. A comprehensive review of lithium-ion battery thermal management with bibliometric analysishttps. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, vol. 215, art. no. 110014. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110014

[5] Zhang G. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy conversion and management*, 2021, vol. 229, art. no. 113715.

[6] Karimi G., Li X. Thermal management of lithium-ion batteries forelectric vehicles. *Int. J. Energy Res.*, 2013, vol. 37, pp. 13–24. https://doi.org/10.1002/er.1956

[7] Солнцев А.А., Асоян А.Р., Федюшкина О.В., Веденеев А.А. Совершенствование системы термостатирования литий-ионных аккумуляторных батарей электромобиля. *Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта. 80-я науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ: сб. тр.* Москва, МАДИ, 2022, с. 83–88.

Determining the required heater power for battery thermal management system in an electric mini-loader under winter conditions

Bruy Daniil Andreevich **bruy.d@bmstu.ru**

Butarovich Dmitry Olegovich **buta73@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The power consumption of the heater for the traction battery thermal management system of an electric mini-loader in winter conditions under typical operating modes was presented using mathematical modeling in the MATLAB environment. Based on the results of the work, conclusions were made about the most demanding operating modes of the mini-loader from the perspective of the energy consumption of the traction battery thermal management system heater.

Keywords: *mini-loader, thermal management system, traction battery, heater, operating modes, winter conditions*

УДК 629.34

Определение спектра нагружения электромеханической трансмиссии электробуса при знакопеременных нагрузках на маршруте

Бутарович Дмитрий Олегович buta73@bmstu.ru
Паньшин Максим Владимирович panshin.m.v@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена методика определения спектра нагружения электромеханической трансмиссии электробуса с учетом знакопеременных нагрузок от рекуперативного торможения. Представлен алгоритм, включающий сбор данных через шину CAN (Controller Area Network), преобразование временных рядов и цикловый анализ методом rain-flow counting в программном комплексе KISSsoft. Показано построение матрицы спектра нагружения для маршрута электробуса № 154 г. Москвы. Полученные результаты служат основой для корректной оценки усталостной долговечности зубчатых передач.

Ключевые слова: *спектр нагружения, электробус, знакопеременное нагружение, рекуперативное торможение, метод дождя, CAN-шина*

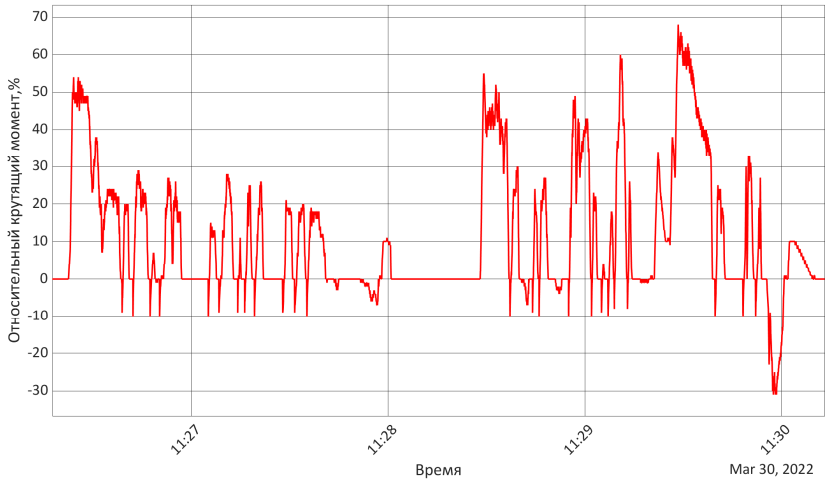
Современные электромеханические трансмиссии (ЭМТ) электробусов характеризуются уникальным режимом работы, обусловленным спецификой городской эксплуатации и применением рекуперативного торможения [1]. В отличие от традиционных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, трансмиссии электробусов подвергаются знакопеременному нагружению, что существенно влияет на их усталостную долговечность. Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки точных методов оценки нагрузочных режимов, учитывающих эту особенность.

Предлагаемый метод определения спектра нагружения включает в тебя три этапа, обеспечивающих комплексный подход к анализу нагрузочных характеристик трансмиссии.

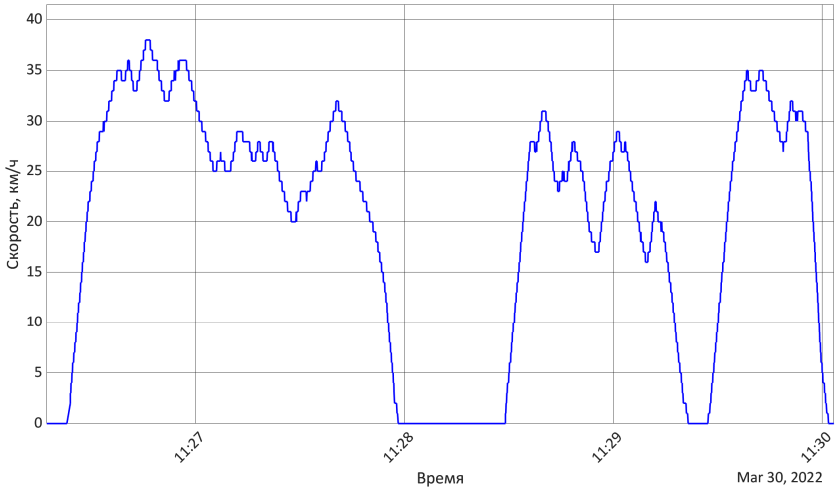
Первый этап, получивший название режимометрирование, представляет собой сбор исходных данных через CAN-шину транспортного средства. В процессе движения электробуса регистрируются временные ряды относительного крутящего момента и скорости с частотой дискретизации, достаточной для последующего анализа. Особенностью данного этапа является необходимость обеспечения синхронности записей различных параметров, что является критически важным для последующей корректной обработки данных. Исходные данные, полученные в результате режимометрирования, представлены на рис. 1.

На втором этапе выполняется преобразование собранных данных. Относительные значения крутящего момента переводятся в абсолютные величины

с использованием калибровочных коэффициентов и номинального максимального момента электропортального моста, составляющего 485 Н·м [2]. Параллельно осуществляется преобразование скорости движения в частоту вращения вала передачи на основе кинематической схемы трансмиссии. Данное преобразование учитывает передаточные числа всех элементов кинематической цепи, включая редуктор электропортального моста и вспомогательные передачи.



а



б

Рис. 1. Исходные данные полученные в результате режимометрирования:
а — исходные данные по распределению относительного крутящего момента во времени;
б — исходные данные по скорости движения транспортного средства

Третий, наиболее ответственный этап, заключается в проведении циклового анализа методом rainflow-counting method с использованием специализированного программного обеспечения KISSsoft [3]. В рамках данного этапа осуществляется идентификация всех значимых нагрузочных циклов, их классификация и статистическая обработка. Применение модуля «определение спектра нагружений из временного ряда» позволяет автоматизировать процесс схематизации случайного процесса нагружения и построения матрицы спектра нагружения. Важным аспектом данного этапа является выбор оптимальных параметров анализа, включая количество интервалов группировки нагрузок и стратегию их распределения.

Практическая реализация предлагаемого метода выполнена для электробуса ЛиАЗ-6274 на маршруте № 154 г. Москвы. Параметры маршрута и схема движения электробуса по данному маршруту показаны на рис. 2. Результатом применения методики стало построение матрицы спектра нагружения, представляющей собой упорядоченную совокупность идентифицированных нагрузочных циклов. Каждый цикл характеризуется амплитудой и средним значением крутящего момента, что позволяет провести детальный анализ нагрузочных режимов трансмиссии. Для обеспечения репрезентативности результатов использовано 10–15 интервалов группировки нагрузок при стратегии средней прогрессии, что обеспечило оптимальный баланс между детализацией спектра и вычислительной эффективностью.



Рис. 2. Параметры маршрута 154 электробуса г. Москвы

Матрица спектра нагружения ЭМТ электробуса при знакопеременных нагрузках на маршруте 154 показана на рис. 3.

Особенностью полученного спектра нагружения является его способность адекватно отражать знакопеременный характер нагружения трансмиссии электробуса. Анализ матрицы нагрузок показал наличие значительной доли циклов с отрицательными значениями момента, что непосредственно связано с работой системы рекуперативного торможения. Данное обстоятельство подтверждает необходимость учета специфики ЭМТ при оценке их долговечности.

	Частота [%]	Крутящий момент [Nm]	Частота вращения [1/min]	$K_{H\beta}$	Y_{M1}	Y_{M2}
1	1.969000	-188.9550	2263.2000	1.2908	2.2264	2.1642
2	1.987000	-184.3650	2263.2000	1.2980	2.2264	2.1642
3	2.236000	-155.0400	2263.2000	1.3544	2.2264	2.1642
4	43.178000	112.7950	2263.2000	1.4626	1.0000	1.0000
5	1.987000	112.7950	2263.2000	1.4626	1.0000	1.0000
6	1.969000	219.1300	2263.2000	1.2507	0.7820	0.8253
7	23.478000	219.1300	2263.2000	1.2507	1.0000	1.0000
8	1.974000	219.1300	2263.2000	1.2507	1.2772	1.1973
9	1.969000	288.5750	2263.2000	1.1904	0.7983	0.8391
10	1.971000	288.5750	2263.2000	1.1904	0.8191	0.8564
11	3.765000	288.5750	2263.2000	1.1904	1.0000	1.0000
12	1.969000	288.5750	2263.2000	1.1904	1.4123	1.2848
13	1.969000	326.5700	2263.2000	1.1683	0.8151	0.8531
14	1.970000	326.5700	2263.2000	1.1683	0.8345	0.8691
15	1.981000	326.5700	2263.2000	1.1683	1.0000	1.0000
16	1.969000	326.5700	2263.2000	1.1683	1.4943	1.3354
17	1.969000	341.8700	2263.2000	1.1607	0.8400	0.8737
18	1.969000	344.5050	2263.2000	1.1595	0.8191	0.8564

Рис. 3. Спектр нагружения ЭМТ электробуса при знакопеременных нагрузках на маршруте

Полученный спектр нагружения адекватно отражает знакопеременный характер нагружения ЭМТ электробуса и служит основой для последующего расчета усталостной долговечности зубчатых передач по стандарту ISO 6336 [4, 5]. Важным преимуществом предложенной методики является возможность учета реальных эксплуатационных режимов, что повышает достоверность прогнозных оценок ресурса. Разработанная методика позволяет не только корректно оценивать ресурс трансмиссий электробусов, но и оптимизировать процессы их проектирования и испытаний. Полученные резуль-

таты могут быть использованы для совершенствования алгоритмов управления рекуперативным торможением с целью снижения нагрузочного воздействия на элементы трансмиссии.

Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для объективной оценки долговечности трансмиссий электробусов, что особенно актуально в условиях массового перехода на электрический транспорт. Предложенный подход позволяет сократить сроки проведения испытаний и повысить точность прогнозирования ресурса, что имеет большое значение для производителей транспортных средств и компонентов.

Список источников

[1] Бутарович Д.О., Паньшин М.В., Паньшин А.В. Режимометрирование нагруженности электромеханической трансмиссии электробуса ЛиАЗ-6274 при движении на маршрутах г. Москвы с использованием телематического сервиса. *Труды НАМИ*, 2024, № 4(299), с. 69–79.

[2] *Устройство и техническое обслуживание электробуса. Учебное пособие для подготовки водителей транспортных средств категории D. Корпоративный университет Транспортного комплекса.* URL: https://sop.mosmetro.ru/wp-content/uploads/2022/03/TK-voditel-D-ustrojstvo-elektrobusa.pdf (дата обращения 22.10.2025).

[3] Kissling U. Use of Duty Cycles or Measured Torque-Time Data with AGMA Ratings. *Gear Technology*, 2022, November/December, pp. 49–55.

[4] ISO 6336-2:2019. *Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 2: Calculation of surface durability (pitting).* 2019, 37 p.

[5] ISO 6336-3:2019. *Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 3: Calculation of tooth bending strength*. 2019, 55 p.

Determination of the load spectrum of an electric bus transmission under alternating loads on the route

Butarovich Dmitry Olegovich buta73@bmstu.ru
Panshin Maxim Vladimirovich panshin.m.v@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The method for determining the load spectrum of an electric bus electromechanical transmission taking into account alternating loads from regenerative braking is considered. An algorithm is presented that includes data collection via CAN bus, time series transformation and cycle analysis using the rain-flow counting method in KISSsoft software. The construction of a load spectrum matrix for route No. 154 in Moscow is shown. The results obtained serve as the basis for a correct assessment of the fatigue life of gear transmissions.

Keywords: *load spectrum, electric bus, alternating loading, regenerative braking, rain-flow method, CAN bus*

УДК 621.791

Формирование композитной структуры рабочей поверхности подшипников скольжения методом ХГДН

Грабарев Андрей Васильевич[1] grabarev_av@paoktz.ru
Костин Михаил Сергеевич[1] kostin_ms2@paoktz.ru
Алакин Виктор Михайлович[2] alakin.vm@bmstu.ru

[1] *ПАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия*
[2] *КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия*

Анализ высоконагруженных подшипников скольжения выявил недостаток сцепления рабочих слоев с основой, износостойкости и коррозионной стойкости. Выявлена значительная материалоемкость и трудоемкость изготовления подшипников на основе Б83. Анализ литературы и опыты выявили перспективу упрочняющих и экономичных подслоев для Б83 и ПЭЭК в виде композитной структуры методом ХГДН. Были исследованы варианты подслоев под Б83 или ПЭЭК на основе Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al и Al–Zn. Результаты опытов показали эффективность подслоев Sn, Cu, Cu–Zn и Al–Zn в виде повышения сцепления с Б83 или ПЭЭК методом ХГДН, который не подвергает подслои и основу перегреву и короблению.

Ключевые слова: *подшипники скольжения, холодное газодинамическое напыление, Б83, ПЭЭК, подслой, композит, опыты, прочность сцепления, износостойкость*

Анализ эксплуатации подшипников скольжения высоконагруженных транспортных и энергетических машин выявил недостаток прочности сцепления рабочих слоев Б83 и фторопластов с основой, недостаточную износостойкость, термическое разупрочнение и коррозионную стойкость. Одной из причин ремонтных и аварийных остановов паровых турбин ТЭС и АЭС также являются преждевременный износ, повреждения и отслоения рабочего слоя подшипников скольжения. Традиционные технологии изготовления и ремонта методами заливки или наплавки требуют нескольких производственных участков и значительного набора специального оборудования и значительного расхода материалов, что приводит к высоким затратам на их производство. На основе анализа процессов термического и холодного газодинамического напыления, авторами была предложена возможность формирования послойных рабочих структур для машиностроения и также для поверхностей подшипников скольжения (рис. 1). В этой связи ранее были проведены опытные работы по применению ХГДН на деталях машин, которые позволили повысить прочность сцепления ремонтных покрытий и качество их структур путем комбинации напыления нескольких слоев металлов при снижении трудовых и материальных затрат. В процессе развития исследований авторы предложили перспективное направление многослойного формирования рабочих структур подшипников путем поочередного напыления нескольких упрочняющих подслоев и рабочего Б83 в виде композита методом ХГДН на одной установке, которая

за один рабочий цикл ХГДН позволяет формировать нужный композитный состав [1]. Этот прием позволяет повысить прочность сцепления слоев с основой за счет подбора материалов и беспрерывного процесса напыления нескольких подслоев. В этом случае положительный результат достигается за счет минимизации времени перехода от слоя к слою, снижения окисных процессов при щадящей температуре нагрева детали и слоев композита в пределах от 80 до 120 °С. Эти пределы нагрева детали и подслоев позволили также снизить до минимума разность и величину тепловых расширений подслоев и вероятности их отслоений, в т. ч. от основы. Применение компактной установки для ХГДН фирмы ДИМЕТ позволит формировать композитные рабочие поверхности с меньшими ресурсными и трудовыми затратами относительно штатных заводских технологий формирования Б83.

Применение ХГДН по исследованиям Ю.К. Леванова, О.Б. Бердника и др. показали, что напыление слоя Б83 обеспечивает более мелкодисперсную и прочную структуру рабочего покрытия более устойчивую к высоким нагрузкам, что является предпочтительным для увеличения ресурса и снижения коэффициента трения [2]. Однако при напылении слоя Б83 методом ХГДН выявили также недостаточную прочность сцепления с основой подшипника в сравнении с наплавкой. Такая проблема по прочности сцепления ранее возникла и при формировании рабочего слоя из ПЭЭК на подшипниках из бронзы и стали. Поэтому для решения задачи по прочности сцепления в начале исследовали диффузионную совместимость Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al и Al–Zn на предмет прочного соединения в составе композита между собой и далее с Б83 и ПЭЭК [3, 4].

На основании результатов анализа провели экспериментальные исследования по этапам: на первом в опытах определили практическую совместимость металлов Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al и Al–Zn по прочности их сцепления между собой и с основой подшипника методом ХГДН (рис. 2–4), а на втором этапе определили прочность сцепления финишного подслоя с рабочими слоями Б83 или ПЭЭК; на каждом этапе опытов определили параметры и режимы работы соплового блока и установки ДИМЕТ в целом, обеспечившие прочностные результаты напыления различных подслоев из порошков Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al и Al–Zn с учетом определенной очередности их соединения в общем композите [5]. На следующем этапе с учетом обоснования состава композитной структуры и режимов ХГДН, провели финишное напыление Б83 или припекание ПЭЭК (рис. 5) и также обосновали термические и силовые параметры, состав приспособлений, оборудования и контрольных приборов [6]. В итоге провели многочисленные испытания образцов на прочность сцепления композитной структуры в целом и качество рабочей поверхности в лаборатории.

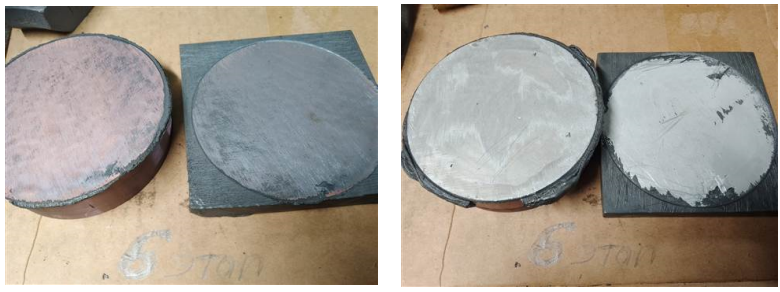
В результате многочисленных опытов получили практические результаты и представили их в виде снимков формирования исходных композитных структур для подшипников скольжения методом ХГДН, далее снимки примеров отслоения подслоев и поиска прочных соединений и положительных итогов термического припекания ПЭЭК.



Рис. 1. Примеры вариантов формирования композитных структур методом послойного напыления порошковых материалов Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al и Al–Zn на различные основы



Рис. 2. Варианты поисковых опытов с результатами отслоения композитной структуры по причине низкой прочности сцепления подслоев из Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al и Al–Zn и также отслоения этих подслоев с рабочими слоями ПЭЭК или Б83



а *б*

Рис. 3. Вариант отслоения покрытия (*а*) Cu от ПЭЭЭК в результате не соответсвия материалов и температурного режима припекания и (*б*) пример межслойного отслоения в структуре Al и Al–Zn в результате не соотвествия состава подслоев и режимов ХГДН



а *б*

Рис. 4. Варианты проведения анализа причин отслоения структуры композита:
а — при напылении подслоев Cu и Cu–Zn; *б* — при напылении подслоев Al и Al–Zn с признаками з начительного окисления подслоев при повторных, многослойных проходах соплового аппарата при наращивании слоя и также в процессе значительного нагрева детали для припекания ПЭЭК



Рис. 5. Варианты деталей с полным формированием композитных рабочих поверхностей и положительными результатами по прочности сцепления многослойной структуры образованной методом ХГДН и припеканием ПЭЭК

В результате проведения исследований определили составы порошковых металлов Cu, Cu–Zn и Al и Al–Zn для формирования комплекса подслоев, обеспечившие прочное сцепление в комплексе с основами подшипников из стали и бронзы между собой, а также с рабочими поверхностями Б83 и ПЭЭК. В результате анализа и практических опытов предложили к применению на практике состав материалов Cu, Cu–Zn и Al и Al–Zn, параметры и режимы работы соплового блока и установки ДИМЕТ, обеспечивающие высокую прочность сцепления подслоев Cu, Cu–Zn и Al, Al–Zn с основами подшипников из стали и бронзы, а также с Б83 и ПЭЭК в виде комплексной композитной структуры. Также предложены газодинамические, термические

и силовые режимы процессов напыления Б83 и припекания ПЭЭК и соответствующие составы технологических приспособлений, оборудования и контрольных приборов.

Список источников

[1] Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Щербакова И.О., Муравьева Т.И., Алакин В.М. *Газодинамическое напыление медно-цинковых покрытий типа «Латунь».* Калуга, Манускрипт, 2025.

[2] Леванов Ю.К., Бердник О.Б., Царева И.Н., Кривина Л.А. Газодинамическое антифрикционное покрытие баббита для подшипников скольжения роторов турбины. *Вестник научно-технического развития*, 2020, № 4(152), с. 12–19.

[3] Биргер Е.М., Архипов В.Е., Поляков А.Н. Газодинамическое напыление. Физические основы и параметры процесса. Обзор. Часть 2. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2019, т. 15, № 7, с. 309–317.

[4] Турдубаева К.В. *Нанесение антифрикционных покрытий порошком Б-83 методом холодного газодинамического напыления.* Томск, Томский политехнический университет, 2019.

[5] Солдатенков С.И. *Исследование, разработка технологии и оборудования для получения покрытий методом холодного газодинамического напыления.* Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2000, 22 с.

[6] Балданов К.П. К расчету параметров холодного газодинамического напыления деталей машин с использованием установки Димет-405. *Вестник ВСГУТУ*, 2019, № 1(72), с. 69–73.

Formation of a composite structure of the working surface of sliding bearings using the HGDN method

Grabarev Andrey Vasilyevich grabarev_av@paoktz.ru
Kostin Mikhail Sergeevich kostin_ms2@paoktz.ru
Alakin Viktor Mikhailovich alakin.vm@bmstu.ru

[1] *PJSC Kaluga Turbine Plant, Kaluga, Russia*

[2] *Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia*

The analysis of high-load plain bearings revealed a lack of adhesion of the working layers to the base, wear resistance and corrosion resistance. A significant material consumption and labor-intensive production of bearings based on B83 was revealed. The literature analysis and experiments revealed the prospect of strengthening and economical sublayers for B83 and PEEC in the form of a composite structure by the HGDN method. The options of sublayers under B83 or PEEC based on — Sn, Ni, Ni–Zn, Cu, Cu–Zn, Al and Al–Zn were investigated. The results of the experiments showed the effectiveness of the sublayers — Sn, Cu, Cu–Zn, and Al–Zn — in terms of increasing adhesion to B83 or PEEC using the HGDN method, which does not cause overheating or warping of the sublayers or base.

Keywords: *plain bearings, cold gas dynamic spraying, B83, PEEK, underlayer, composite, experiments, adhesion strength, wear resistance*

УДК 629.113

Требования к системе подрессоривания болида в соответствии с техническим регламентом Формулы-4 в 2025 г.

Шарандин Павел Алексеевич sharandinpa@student.bmstu.ru
Плахов Сергей Александрович sa.plahov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен обзор ключевых требований и параметров к системе подрессоривания болида в соответствии с техническим регламентом Формулы-4 на сезон 2025 г. Рассмотрены ключевые параметры и ограничения в конструкции, направленные на повышение безопасности, надежности и управляемости болидов. Также обсуждаются инженерные подходы к конструкции систем подрессоривания и предложены решения, подходящие под требования технического регламента.

Ключевые слова: *Формула-4, система подрессоривания, подвеска, болид, гоночный автомобиль*

В 2025 г. стартовала новая российская Формула-4. На данный момент в России используются итальянские болиды Tatuus F4-T421, но появилась задача создания болида российского производства. В связи с этим актуальной задачей является рассмотрение элементов системы подрессоривания болида Формулы-4. Статья направлена на систематизацию знаний по конструкции систем подрессоривания гоночных автомобилей Формулы-4 в соответствии с техническим регламентом 2025 года.

Система подрессоривания (подвеска) с тянущей (pull-rod) и толкательной (push-rod) (рис. 1) тягой амортизатора подходят для гоночного автомобиля (болида) благодаря оптимизации аэродинамики и распределению веса. Эти системы подвески характерны для гоночных лиг, ориентированных на трековые гонки. Выбор между подвеской push-rod и pull-rod часто зависит от конкретного дизайна автомобиля и аэродинамических требований. В некоторых случаях команды используют комбинацию обеих систем: например, pull-rod на задней подвеске для оптимизации аэродинамики, а push-rod на передней для удобства доступа, но в соответствии с техническим регламентом Формулы-4 следует выбрать подвеску типа push-rod [1, 2]. Передняя подвеска должна быть двухрычажная, состоять только из двух амортизаторов со встроенными пружинами, двух коромысел и одного стабилизатора поперечной устойчивости. Любые дополнительные элементы запрещены. Коромысла должны приводиться в действие напрямую толкателями, а амортизаторы и стабилизатор — посредством коромысел. Требования к задней подвеске такие же, как и для передней подвески [1].

Часть подвески не скрыта за корпусом болида, например рычаги подвески. Очень часто их стараются сделать более обтекаемой формы для увеличения показателей аэродинамики. Технический регламент Формулы-4 допуска-

ет это при условии, что соотношение сторон поперечного сечения каждого элемента подвески не должно превышать 3,5:1 и должно быть симметричным относительно главной оси. Допускается увеличение этого отношения и асимметрия в областях креплений (максимум на 25 % длины элемента) [1].

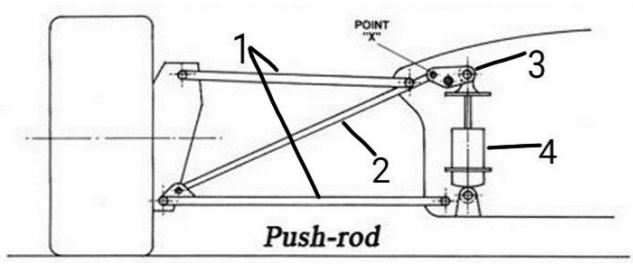


Рис. 1. Подвеска типа push-rod:
1 — поперечные рычаги; *2* — толкающая штанга; *3* — коромысло (рокер); *4* — амортизатор

Все элементы подвески должны быть выполнены из однородного металлического материала. Наилучшим выбором является титан. Титановый сплав обладает множеством преимуществ, включая низкую плотность, высокую прочность, исключительную коррозионную стойкость и термостойкость. Он может похвастаться высокой текучестью и прочностью на разрыв, способен выдерживать значительные внешние воздействия без деформации или разрушения [3]. Стойка подвески должна быть цельной деталью и выполнена из алюминиевого сплава (обработанного или литого) согласно техническому регламенту Формулы-4. Использование листового металла запрещается [1, 4].

Разрешены только обычные винтовые пружины в сочетании с регулируемыми гидравлическими амортизаторами с одним поршнем. Жидкость в амортизаторе может быть под давлением.

Для колеса допускается использование только одного подшипника.

Чтобы предотвратить отделение колеса в случае отказа всех соединительных элементов подвески, должны быть установлены гибкие тросы (рис. 2) с площадью поперечного сечения более 110 мм². Их единственная функция — не допустить отделения колеса от автомобиля. Тросы и их крепления должны быть спроектированы так, чтобы минимизировать контакт колеса с головой водителя при аварии. Каждое колесо должно иметь два троса. Чаще всего тросы изготовляют из сверхпрочного материала под названием зайлон. Он очень прочен, начинает разлагаться при температуре свыше 780 °C. Часто тросы спрятаны в элементы подвески, регламент это допускает при условии, что в одном элементе подвески может быть только один трос.

Технический регламент запрещает: активную подвеску, хромирование любых стальных элементов, регулируемые по положению, частоте или ускорению амортизаторы, клапаны типа blow-off, инерционные клапаны, электронные или гидравлические связи между амортизаторами [1].



Рис. 2. Гибкий трос в элементе подвески

Заключение. В соответствии с техническим регламентом Формулы-4, как оптимальное решение, можно предложить использование передней и задней подвески типа push-rod; регулируемые амортизаторы с возможностью изменения жесткости для адаптации подвески под разные условия трассы; использование титана для поперечных рычагов подвески; по одному тросу из зайлона на каждое колесо, расположенному внутри рычага подвески. Для уменьшения стоимости и повышения надежности системы целесообразна унификация компонентов. Таким образом, конструкция подвески должна соответствовать как техническим требованиям регламента, так и обеспечивать безопасность, надежность и управляемость.

Список источников

[1] *2025 FIA Formula 4 — Technical regulations.* URL: https://api.fia.com/sites/default/files/2025_fia_formula_4_technical_regulations_-_issue_2_-_2024.12.11.pdf (accessed 01.10.2025).

[2] Бражкин А.В., Головин Д.В. Анализ конструкций подвесок болида класса «Формула Студент». *Международный научно-исследовательский журнал*, 2016, № 1 (43), с. 14–15.

[3] Гаврилов Д.И., Карягин М.О., Нуяндин В.Д. Титан: свойства, получение, применение. *Academy*, 2017, № 5(20), с. 1–3.

[4] Бобровский А.В., Зотов А.В., Шабанов А.А., Чижаткина Е.Д. Проектирование подвески гоночного болида. *Современные инновации, системы и технологии*, 2024, № 4(4), с. 601–609.

Requirements for the car's suspension system in accordance with the Formula 4 2025 technical regulations

Sharandin Pavel Alekseevich sharandinpa@student.bmstu.ru
Plahov Sergey Alexandrovich sa.plahov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article provides an overview of the key requirements and parameters for the car's suspension system in accordance with the Formula 4 technical regulations for the 2025 season. The key parameters and limitations in the design aimed at improving the safety, reliability and controllability of the cars are considered. The paper also discusses engineering approaches to the design of springing systems and suggests solutions suitable for the requirements of technical regulations.

Keywords: *Formula 4, suspension, steering, car*

УДК 629.1.02

Влияние высоты центра тяжести на тормозную динамику легкового автомобиля

Парамонов Сергей Сергеевич paramonovss@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен анализ влияния высоты расположения центра масс (ЦМ) легкового автомобиля на его тормозную динамику. Рассмотрены физические основы перераспределения нормальных реакций на осях при торможении, связь этого явления с высотой ЦМ и его последствия для эффективности торможения, устойчивости и управляемости транспортного средства. На основе математического моделирования и анализа сделаны выводы о критической роли данного параметра, особенно для автомобилей повышенной проходимости и коммерческого транспорта.

Ключевые слова: *тормозная динамика, центр тяжести, перераспределение нагрузок, коэффициент сцепления, тормозной путь, устойчивость автомобиля, блокировка колес*

Тормозная динамика является одной из ключевых характеристик активной безопасности автомобиля. На эффективность торможения влияет множество факторов: состояние дорожного покрытия, качество шин, исправность тормозной системы. Однако одним из фундаментальных конструктивных параметров, предопределяющих поведение автомобиля при торможении, является высота расположения его центра тяжести. Актуальность исследования обусловлена растущей популярностью кроссоверов и SUV, имеющих заведомо более высокий центр масс по сравнению с классическими легковыми автомобилями, что вносит коррективы в их поведение в критических ситуациях [1].

При экстренном торможении автомобиль испытывает значительное замедление, направленное противоположно вектору скорости. В соответствии с законом инерции, сила инерции, приложенная в центре масс, создает опрокидывающий момент относительно плоскости контакта колес с дорогой.

Этот момент приводит к динамическому перераспределению нормальных реакций дороги между передней и задней осями. Происходит разгрузка задних колес и дополнительная загрузка передних. Величина изменения этих реакций напрямую зависит от двух параметров: величины замедления (j) и высоты центра тяжести (h).

Уравнения для определения нормальных реакций на передней (R_{z1}) и задней (R_{z2}) осях во время торможения имеют вид:

$$R_{z1} = \frac{mgL_2}{L} + \frac{mjh}{L};$$

$$R_{z1} = \frac{mgL_1}{L} - \frac{mjh}{L},$$

где m — масса автомобиля; g — ускорение свободного падения; j — замедление автомобиля; L — колесная база автомобиля; L_1, L_2 — расстояния от центра масс до передней и задней оси соответственно; h — высота центра тяжести.

Из анализа уравнений следует, что чем выше параметр h, тем значительнее перераспределяется нагрузка: передняя ось нагружается сильнее, а задняя разгружается.

Эффективность тормозной системы определяется способностью реализовать максимально возможное замедление, ограниченное коэффициентом сцепления шин с дорогой f [2]. Потенциал тормозной силы на каждом колесе пропорционален нормальной реакции (R_z) и коэффициенту сцепления:

$$F_{\text{торм}.max} = R_z f.$$

При повышении высоты ЦМ разгрузка задней оси становится более выраженной. Это приводит к тому, что задние колеса раньше достигают порога блокировки при одном и том же давлении в тормозном приводе. Если тормозные силы на осях не сбалансированы в соответствии с динамическим изменением нагрузок (что обеспечивается, например, регулятором тормозных сил или современной ABS), возникает преждевременная блокировка задних колес [3].

Заблокированные задние колеса теряют способность воспринимать боковые силы, что резко снижает устойчивость автомобиля. Автомобиль становится склонным к заносу — развороту вокруг вертикальной оси. Таким образом, высокий центр тяжести не только увеличивает продольный опрокидывающий момент, но и косвенно способствует потере поперечной устойчивости из-за ранней блокировки задних колес.

Помимо риска заноса, высоко расположенный ЦМ негативно сказывается на общем поведении автомобиля. При торможении в повороте или на неровной дороге дополнительные крены кузова, обусловленные высокой подвеской, приводят к изменению положения ЦМ относительно опорной поверхности. Это создает нестабильность в контакте шин с дорогой, ухудшая предсказуемость реакции автомобиля на действия водителя.

Более того, значительное перенос веса на переднюю ось приводит к повышенной нагрузке на элементы передней подвески и шин, что может способствовать их ускоренному износу. Передние колеса, будучи сильно нагруженными, менее склонны к блокировке, но автомобиль при этом может терять в маневренности [4].

Полученные результаты объясняют, почему автомобили с высоким центром тяжести (внедорожники, микроавтобусы, грузовики) требуют особого подхода к настройке тормозной системы. Для них критически важна корректная работа регулятора тормозных сил, который ограничивает давление на задние тормозные механизмы, предотвращая их блокировку. Современные системы ABS и ESP (система курсовой устойчивости) также должны быть адаптированы под данные характеристики.

Для водителей это означает необходимость понимания изменений в поведении своего автомобиля. Торможение на высоких скоростях и, особенно, в поворотах на автомобиле с высоким ЦМ требует большей осторожности и плавности действий. Неравномерная загрузка автомобиля, поднимающая ЦМ еще выше, дополнительно усугубляет все описанные негативные эффекты.

Проведенный анализ однозначно демонстрирует, что высота центра тяжести является ключевым параметром, определяющим тормозную динамику автомобиля. Повышение высоты ЦМ приводит к более интенсивному динамическому перераспределению нормальных реакций по осям, что влечет за собой:

– повышенный риск блокировки задних колес и потери устойчивости (заноса);

– снижение общего потенциала тормозной системы при неправильной ее настройке;

– ухудшение управляемости и предсказуемости поведения при торможении в сложных условиях.

В свете тенденции к увеличению доли SUV на рынке, понимание и учет данного фактора становятся значимыми не только для инженеров-конструкторов, но и для конечных потребителей, что в совокупности способствует повышению общего уровня безопасности дорожного движения.

Список источников

[1] Литвинов А.С. *Управляемость и устойчивость автомобиля.* Москва, Машиностроение, 2020, 240 с.

[2] Григорин И.П., Сабиров Д.Р. Влияние конструктивных параметров на тормозные свойства полноприводного автомобиля. *Вестник автомобильного транспорта*, 2021, № 3, с. 15–22.

[3] Волков В.П., Баринов С.В. *Теория и расчет тормозных систем автомобилей.* Санкт-Петербург, Политехника, 2019, 180 с.

[4] Wong J.Y. *Theory of ground vehicles.* Hoboken, John Wiley & Sons, 2022, 608 p.

The influence of the center of gravity height on the braking dynamics of a passenger car

Paramonov Sergey Sergeevich paramonovss@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article analyzes the influence of the height of the center of mass (CM) of a passenger car on its braking dynamics. The physical principles of the redistribution of normal reactions on the axles during braking, the relationship of this phenomenon with the height of the CM, and its consequences for braking efficiency, stability, and vehicle controllability are considered. Based on mathematical modeling and analysis, conclusions are drawn about the critical role of this parameter, especially for off-road vehicles and commercial transport.

Keywords: *braking dynamics, center of gravity, load distribution, adhesion coefficient, braking distance, vehicle stability, wheel lock*

УДК 629.33

Основные требования к рулевому управлению раллийного автомобиля

Викторов Артем Александрович viktorovaa@student.bmstu.ru
Булычев Всеволод Валерьевич vvbul@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены принципы проектирования и настройки рулевого управления раллийного автомобиля. Описаны типичные узлы и модификации — от механической передачи до электроусилителя, взаимодействие рулевого механизма с подвеской и трансмиссией, требования к управляемости и безопасности, а также практические рекомендации по адаптации серийной российской техники для соревнований. Такой комплексный подход позволяет повысить эффективность и безопасность управления, адаптируя серийные модели к высоким нагрузкам и требованиям раллийных соревнований.

Ключевые слова: *ралли, рулевое управление, рулевая рейка, рулевые тяги, надежность*

Рулевое управление является одним из основных узлов раллийного автомобиля. Особенности конструкции данного элемента зависят от условий эксплуатации автомобиля.

Рулевое управление в раллийном автомобиле — это не просто механизм изменения направления, это связь между пилотом и трассой. Быстрая реакция руля позволяет пилоту точнее контролировать скорость и проходить через сложные сцепления поверхностей (гравий, песок, асфальт). На базе отечественной серийной платформы важна комбинация надежности, простоты и возможности доработки [1, 2].

Рулевая рейка (рис. 1). Чаще всего современные гоночные и тюнинговые решения базируются на реечном механизме — компактном и с прямой кинематикой. Для ралли предпочтительны усиленные рейки с минимальным люфтом и повышенной жесткостью [1].



Рис. 1. Усиленная рулевая рейка

Рулевая колонка должна быть регулируемой по вылету/наклону, энергоемкой (с деформируемыми зонами) и оснащенной быстрой сменой руля [1].

Усиленные рулевые тяги и наконечники с упором на герметичность шарниров. Главное требование — быстрая замена наконечников [1].

Усилитель (гидравлический/электрический) облегчает работу пилота. Выбор между гидравликой и электрическим усилителем зависит от веса, отклика и возможности регулировки [1].

Крепления и подрамник: жесткость креплений влияет на точность передачи усилий. Чаще всего штатные мягкие элементы заменяют на усиленные [1].

Существует несколько требований к рулевому управлению для раллийного автомобиля.

Короткий рабочий ход: ралли требует «быстрого» передаточного отношения, чтобы небольшой поворот руля дал заметное изменение угла поворота колес. Для серийной рейки это достигается за счет специальных рейковых вставок [2].

Минимальный люфт: любой люфт — потеря времени и точности. Важна тщательная подгонка наконечников и устранение износа в рейке [2].

Чувствительность: пилот должен чувствовать сцепление. Излишний усилитель, фильтрация или неправильная разводка шлангов снижают «чувство дороги» [2].

Ход и защита: большие углы поворота и экстремальные нагрузки требуют усиленной защиты рейки от камней и влаги, а также увеличенного рабочего хода шарниров [2].

Надежность и ремонтопригодность: на ралли важно быстро заменить элемент — от наконечника до секции рейки [2].

Важно помнить, что рулевое управление тесно связано с подвеской и трансмиссией. Поэтому при установке усиленной рулевой рейке нужно учесть:

– изменение углов установки колес ($\gamma_{передние} = -1°$ до $-3°$; $\gamma_{задние} = -1°$ до $-2°$; $\tau = +3°$ до $+6°$) (рис. 2). Необходимо привести в соответствие развал/схождение для стабильности на торможении и входе в поворот;

– корректировку «сход-развал» после установки усиленных или удлиненных рулевых тяг;

– влияние рулевого управления на поведение при боковой нагрузке: жесткость поперечного стабилизатора и реакция амортизаторов меняют обратную связь [3].

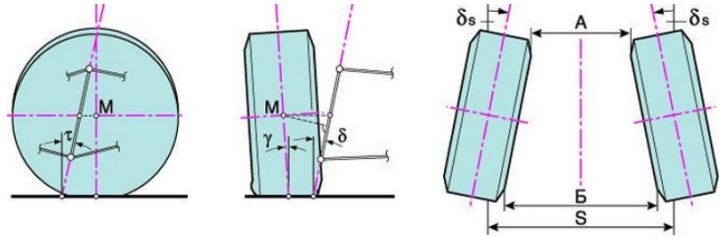


Рис. 2. Угол установки колес в ралли

Вот несколько рекомендаций для создания отечественного аналога раллийного автомобиля:

– анализ платформы: необходимо оценить геометрию штатной подвески и место крепления рейки — часто для серийных кузовов потребуется переходная плита или усиленный подрамник;

– рейка от тюнингового производителя: нужно использовать усиленные рейки с сервисной поддержкой, также отреставрированные оригинальные рейки при правильной доводке могут быть экономичным вариантом;

– защита и герметизация: необходимо установить защитный щит и армированные пыльники, особенно при гравийных спецучастках;

– тест и пилотаж: настройку лучше проводить пошагово: сначала базовая геометрия и жнсткость, затем подбор усилителя и передаточного отношения под конкретного пилота и покрытие [4].

Заключение. В заключении можно сделать вывод, что рулевое управление — ключевой узел в раллийном автомобиле. При адаптации отечественной серийной платформы для ралли важно стремиться к балансу: жесткость и быстрота реакции должны сочетаться с простотой и надежностью. Правильная интеграция рейки, усилителя и кинематики подвески, а также грамотная подготовка запасных частей и тестирование в условиях, близких к гоночным, дадут наилучший результат на гоночной трассе.

Список источников

[1] Кленников В.М., Кленников Е.В. *Автомобиль. Теория и конструкция.* Москва, Машиностроение, 2018, 496 с.

[2] Громов Н.П., Синицын А.Г. *Рулевое управление автомобилей.* Москва, Машиностроение, 2016, 288 с.

[3] *Автоспорт и инженерия.* URL: https://autosport-engineering.ru (дата обращения 11.10.2025).

[4] *Российская автомобильная федерация — РАФ.* URL: https://raf.su (дата обращения 11.10.2025).

Basic requirements for the steering of a rally car

Vikovorov Artem Aleksandrovich viktorovaa@student.bmstu.ru

Bulychev Vsevolod Valerievich vvbul@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article discusses the principles of designing and tuning the steering of a rally car. Typical components and modifications are described, from mechanical transmission to electric power steering, the interaction of the steering mechanism with the suspension and transmission, requirements for handling and safety, as well as practical recommendations for adapting serial Russian equipment for competitions. This comprehensive approach improves the efficiency and safety of driving by adapting production models to the high demands and challenges of rally competitions.

Keywords: *rally, steering, steering rack, tie rods, reliability*

УДК 629.33

Расчет тормозной системы гоночного автомобиля: методы, формулы и практическое применение

Васильев Алексей Александрович vasilevaa3@student.bmstu.ru
Плахов Сергей Александрович sa.plahov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены основные подходы и методы расчетов тормозной системы гоночных автомобилей. Особое внимание уделено моделированию тормозных процессов, расчету тормозных усилий, тепловых нагрузок, эффективности теплообмена и конструктивных особенностей системы. Предложены формулы и практические рекомендации для оптимизации проектирования тормозных систем в условиях высокой скорости и нагрузок. Анализ этих расчетов позволяет определить основные направления совершенствования тормозных систем с целью повышения их надежности, эффективности и безопасности.

Ключевые слова: *формула, тормозная система, гоночный автомобиль, расчеты*

Тормозная система — один из важнейших элементов гоночного автомобиля, напрямую влияющий на безопасность, управляемость и результаты соревнований. В условиях высокой скорости и экстремальных нагрузок правильная расчетная оценка параметров тормозной системы позволяет обеспечить необходимую тормозную эффективность, снизить риск перегрева и отказов, а также повысить долговечность компонентов.

Современные гоночные автомобили используют сложные системы торможения, включающие дисковые тормоза, керамические материалы, системы охлаждения и управление тормозным усилием. В данной статье рассматриваются основные формулы и методы расчетов, применяемые при проектировании и оптимизации таких систем.

Основные параметры и требования к тормозной системе. Для эффективного проектирования тормозной системы необходимо учитывать ряд параметров: масса автомобиля m, максимальная скорость V, время торможения t, радиус тормозных дисков R, коэффициент трения μ, мощность теплового нагрева Q, время и условия охлаждения, рабочие температуры материалов.

Значения этих параметров определяют необходимые усилия, теплообмен, конструктивные решения.

Расчет тормозных усилий и тормозных моментов. Основные уравнения. Для определения тормозных усилий, необходимого для остановки автомобиля, используют второй закон Ньютона и кинематические соотношения. Тормозное усилие F_t, создаваемое системой, должно обеспечить изменение кинетической энергии автомобиля:

$$E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} m V^2.$$

За время торможения t требуется обеспечить тормозной момент, равный:

$$M = F_t \cdot R,$$

где R — радиус тормозных дисков [1, 2].

Тормозная сила F_t рассчитывается по формуле

$$F_t = \frac{m \cdot V}{t}.$$

Это усилие должно быть также скоррелировано с коэффициентом трения μ между тормозными колодками и дисками:

$$F_t = \mu \cdot F_{\text{прижим}},$$

где $F_{\text{прижим}}$ — сила прижатия колодок к дискам [1, 2].

Расчет тормозных усилий на основе кинетической энергии. Общая тормозная мощность, необходимая для остановки автомобиля, определяется как

$$P = \frac{E_{\text{кин}}}{t} = \frac{\frac{1}{2}mV^2}{t}.$$

Это позволяет определить минимальные требования к тормозным усилиям и мощности [1].

Тепловой расчет и теплообмен. Тепловая нагрузка. В процессе торможения выделяется тепло, которое необходимо рассеять, чтобы избежать перегрева материалов.

Объем выделяемого тепла:

$$Q = F_t \cdot V,$$

где Q — тепло, выделяемое за время торможения [1–3].

Тепловая нагрузка на диски. Для оценки нагрева дисков используют формулы теплопередачи. Максимальная температура диска:

$$T_{max} = T_{\text{нач}} + \frac{Q}{C \cdot m_{\text{диск}}},$$

где $T_{\text{нач}}$— начальная температура; C — теплоемкость материала; $m_{\text{диск}}$ — масса диска. Также важно учитывать теплообмен с окружающей средой и системами охлаждения.

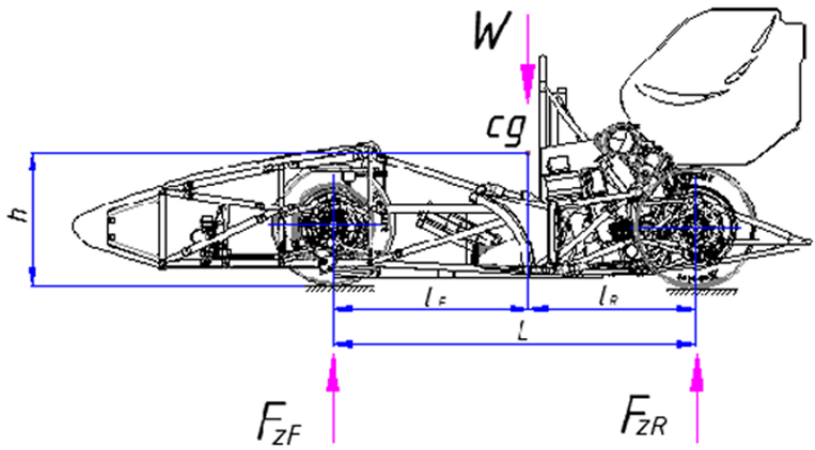
Расчет эффективности охлаждения. Эффективность системы охлаждения определяется по формуле:

$$Q_{\text{рассеяния}} = h \cdot A \cdot \left(T_{\text{диск}} - T_{\text{окр}}\right),$$

где h — коэффициент теплообмена; A — площадь поверхности диска; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды. Для обеспечения безопасности необходимо, чтобы температура диска не превышала допустимых значений [2, 4].

Конструктивные аспекты и материалы. Для повышения эффективности тормозных систем используют материалы с высокими тепловыми характеристиками, такие как керамика, карбон-керамика и специальные сплавы. Конструктивные решения включают вентиляцию дисков, системы охлаждения и теплоотводящие элементы. Также важна правильная балансировка системы изоляции вибраций, что достигается точным расчетом массы и центровки компонентов [4].

Практическое применение расчетов. На практике инженеры используют компьютерное моделирование и расчетные программы для оценки параметров системы. Однако базовые формулы и методы остаются фундаментом проектирования. Важным аспектом является проведение тестов и измерений на стендах и трассах для калибровки расчетных моделей (см. рисунок) и выявления дополнительных факторов, таких как износ, деградация материалов и динамика торможения [4].



Расчетная модель

Заключение. Расчеты тормозной системы гоночного автомобиля основаны на комплексном использовании физических формул, теплообмена и механики. Правильное проектирование обеспечивает необходимую тормозную эффективность, надежность и безопасность в условиях экстремальных нагрузок. В дальнейшем развитие технологий и материалов позволит создавать еще более эффективные и долговечные тормозные системы.

Список источников

[1] Бутлеров А.М. Механика и теплотехника в автомобильном спорте. Москва, Наука, 2015.

[2] Иванов А.М., ред. Студенческие инженерные проекты. VI Всерос. форум: матер. Москва, Мир науки, 2020, 159 с.

[3] Drive2.*ru. Автомобильная социальная сеть*. URL: https://www.drive2.ru/b/527180642220245723/ (дата обращения 16.10.2025).

[4] Иванов И.И., Петров В.В. Тепловой расчет тормозных систем. Санкт-Петербург, Изд-во Политех, 2018.

Calculation of the braking system of a racing car: methods, formulas and practical application

Vasiliev Alexey Alexandrovich vasilevaa3@student.bmstu.ru

Plahov Sergey Alexandrovich sa.plahov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article discusses the main approaches and methods for calculating the braking system of racing cars. Special attention is paid to modeling braking processes, calculating braking forces, thermal loads, heat transfer efficiency and design features of the system. Formulas and practical recommendations for optimizing the design of braking systems in conditions of high speed and loads are proposed. The analysis of these calculations allows us to determine the main directions for improving braking systems in order to increase their reliability, efficiency and safety.

Keywords: *formula, braking system, racing car, calculations*

УДК 629.33

Алгоритм аэродинамического расчета переднего антикрыла болида Формулы-4 в программе SolidWorks (Flow Simulation)

Григорьев Степан Дмитриевич m0bik18@yandex.ru
Плахов Сергей Александрович sa.plahov@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен алгоритм расчета аэродинамических показателей переднего антикрыла болида Формулы-4, таких как скорость потока воздуха, давление действующие на различные участки и давление воздуха вокруг антикрыла, в программе SolidWorks Flow Simulation. Эти показатели позволяют определить насколько антикрыло эффективен в воздушном потоке при разных скоростях, а также найти места в которых возникают турбулентности.

Ключевые слова: *аэродинамика, Формула-4, переднее антикрыло, SolidWorks*

Переднее антикрыло болида Формулы-4 — это конструктивный элемент, который создает прижимную силу и направляет потоки воздуха в нужных направлениях. Прижимная сила возникает в результате разницы давлений сверху и снизу антикрыла, также позволяет болиду проходить повороты на высоких скоростях.

Алгоритм расчета. В программе SolidWorks Flow Simulation [1] используются методы расчета аэродинамики — численное моделирование движения и теплообмена текучей среды (воздуха) вокруг объектов. Это позволяет:

– определять аэродинамические характеристики (коэффициенты, силы);

– анализировать распределение потока в разных областях модели.

Модуль Flow Simulation использует алгоритмы вычислительной гидродинамики (CFD) для решения сложных уравнений потока на основе заданных параметров и граничных условий.

Процесс расчета аэродинамики в SolidWorks Flow Simulation включает несколько этапов.

Создание геометрии объекта, который нужно проанализировать. Можно создать 3D-модель или импортировать существующую конструкцию из другого программного обеспечения. Важно, чтобы геометрия точно представляла физический объект — неточности могут привести к неправильным результатам расчета:

– настройка симуляции. Определяются параметры среды (плотность, вязкость), начальные условия (скорость) и граничные условия (условия на входе и выходе);

– создание сетки — геометрия разбивается на небольшие элементы (ячейки сетки). Это позволяет программе использовать сетку для расчета потока;

– определение граничных условий — указывается поведение жидкости в разных регионах геометрии: на входах, выходах, стенках, в плоскостях симметрии;

– запуск симуляции: время расчета может варьироваться в зависимости от сложности геометрии и желаемого уровня точности. Рекомендуется периодически контролировать прогресс и сходимость симуляции.

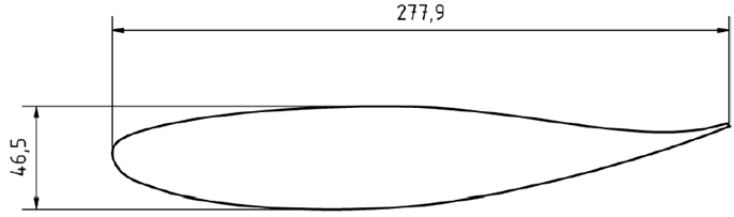
Некоторые параметры, которые можно задать:

– текучая среда, например воздух;

– характеристики поверхности, влияющие на процесс обтекания (например, шероховатости);

– начальные условия — скорость потока, углы атаки и скольжения, число Рейнольдса и другие.

Создание 3D-модели. Создадим 3D-модель переднего антикрыла (рис.1) и рассчитаем силу давления на антикрыло, построим распределение давлений и скорость воздуха, а также создадим симуляцию потока воздуха. Данные для построения модели возьмем из официального технического регламента Формулы-4 [2].



Drawing 2

Points for aerofoil section front wing, all dimensions are in millimetres (see Drawing 2):

1	00.00	00.00	14	-151.58	07.65	27	-263.58	-27.64	40	-112.41	-33.36
2	-11.40	-02.79	15	-163.33	07.59	28	-252.44	-31.35	41	-100.87	-31.19
3	-23.08	-03.94	16	-175.07	07.36	29	-241.00	-33.96	42	-89.38	-28.77
4	-34.82	-03.88	17	-186.80	06.95	30	-229.40	-35.82	43	-77.95	-26.11
5	-46.54	-03.20	18	-198.53	06.31	31	-217.73	-37.06	44	-66.56	-23.24
6	-58.22	-02.03	19	-210.24	05.41	32	-206.02	-37.97	45	-55.22	-20.18
7	-69.86	-00.49	20	-221.92	04.28	33	-194.29	-38.58	46	-43.94	-16.93
8	-81.48	01.20	21	-233.58	02.86	34	-182.55	-38.85	47	-32.72	-13.46
9	-93.11	02.85	22	-245.17	00.96	35	-170.81	-38.78	48	-21.59	-09.71
10	-104.76	04.36	23	-256.66	-01.45	36	-159.07	-38.43	49	-10.54	-05.75
11	-116.43	05.67	24	-267.93	-04.72	37	-147.35	-37.77	50	00.43	-01.54
12	-128.12	06.72	25	-277.16	-11.42	38	-135.66	-36.71			
13	-139.84	07.40	26	-273.74	-21.83	39	-124.01	-35.22			

Рис. 1. Сечение переднего антикрыла

Строим точки по координатам, соединяем кривой линией по точкам и вытягиваем сечение на 685 мм. В результате получаем 3D-модель переднего антикрыла болида Формулы-4. Добавим торцевые пластины размером 290x570x5. Получаем модель переднего антикрыла болида Формулы-4 (рис. 2).

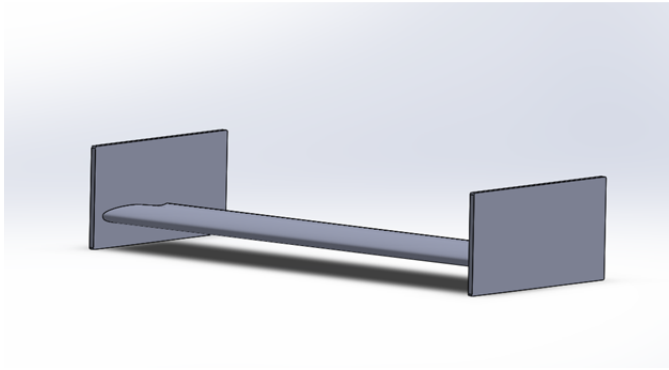


Рис. 2. 3D-модель переднего антикрыла

Создание проекта и задание начальных условий. Для создания проекта, переходим во вкладку Flow Simulation и на верхней панели выбираем создать проект. В дереве слева появляются параметры для входных данных и вокруг нашего объекта формируется рабочая область. Задаем входные данные, для этого правой кнопкой мыши нажимаем на «Входные данные» и выбираем «Общие настройки». В общих настройках на первой вкладке «Тип задачи» включаем гравитацию и меняем тип задачи на внешний. Во второй вкладке «Текучая среда» выбираем Газы-Air (Воздух). Во вкладке «Начальные условия» задаем параметры, из них нас интересует скорость воздуха (рассмотрим при максимальной скорости болида Ф4–250 км/ч = 70 м/с). Задаем скорость на оси Z со знаком минус.

Расчетная область. Расчеты можно производить как в 2D, так и в 3D. Выберем расчет 3D и ограничим область размерами антикрыла, оставив пространство перед крылом и за ним (рис. 3).

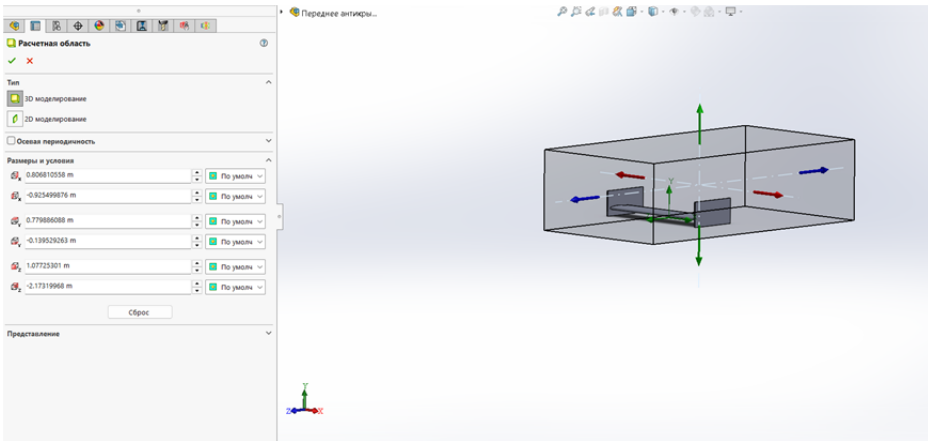


Рис. 3. Настройка расчетной области

Сетка. Сетка бывает глобальной и локальной. Глобальная служит для разделения всего поля на отдельные сегменты, а локальная служит для разделения определенных объектов исследования. От размера сетки будут зависеть точность и результаты. Для антикрыла создадим локальную сетку, выберем поверхности и укажем уровень дробления ячеек на границе. После этого нажимаем правой кнопкой на раздел «Сетка» и нажимаем «Создать сетку…». После завершения генерации сетки, подгружаются результаты (только сетки) и мы можем посмотреть, как разделился наш объект на ячейки. Для этого во вкладке «Результаты-Сетка» нажимаем на «Сетка» правой кнопкой мыши, нажимаем «Добавить…» и выбираем «Сечение-XYZ плоскости». После чего выбираем плоскость YZ и поверхность нашего антикрыла (рис. 4). Также можно разбить само антикрыло на ячейки и посмотреть его дробление.

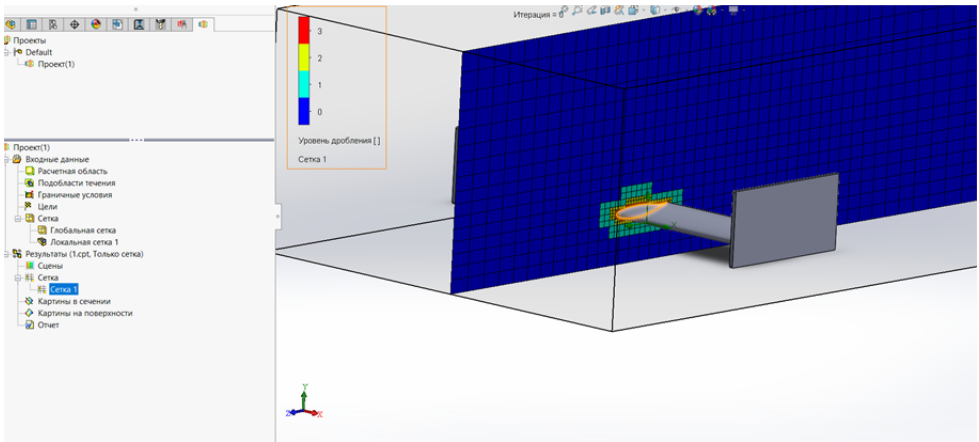


Рис. 4. Визуализация сетки

Запуск исследования. После всех начальных подготовок запускаем исследование и ждем окончания симуляции, для этого на верхней панели нажимаем запуск исследования, после чего появится окно исследования. Если перед запуском мы указали цели исследования в окне исследования мы можем отобразить графики, показывающие данные по исследованию (рис. 5). Если же цели не указаны мы можем отобразить только визуализацию, например давления и скорости вокруг антикрыла.

Анализ данных. Для анализа данных требуется во вкладке «Результаты» выбрать интересующие нас сечения и поверхности, указать какие данные нас интересуют, после чего мы увидим графическое отображение этих данных. В нашем случае получены характеристики давления и скорости потока воздуха.

Проанализировав данные (рис. 6–10), можно сделать вывод, что на антикрыло действует прижимная сила в 500 Н или 50 кг, возникающая в результа-

те разницы давлений и различных скоростях прохождения воздуха над и под антикрылом (давление над антикрылом 102,4 МПа, а под крылом 98,9 МПа, рис. 6–8), также видны потоки воздуха, что поможет в конструировании корпуса болида и учета потоков воздуха. Также видно, что на торцевых пластинах образуются завихрения (рис. 10) и потоки воздуха не проходят в отдельных местах пластин и создаются завихрения, следовательно, их нужно обрезать за ненадобностью и для улучшения воздушного потока. Также изменение геометрии торцевых пластин и изменение ее положения позволит лучше направить поток воздуха на колеса (рис. 9), для снижения сопротивления и уменьшения турбулентности.

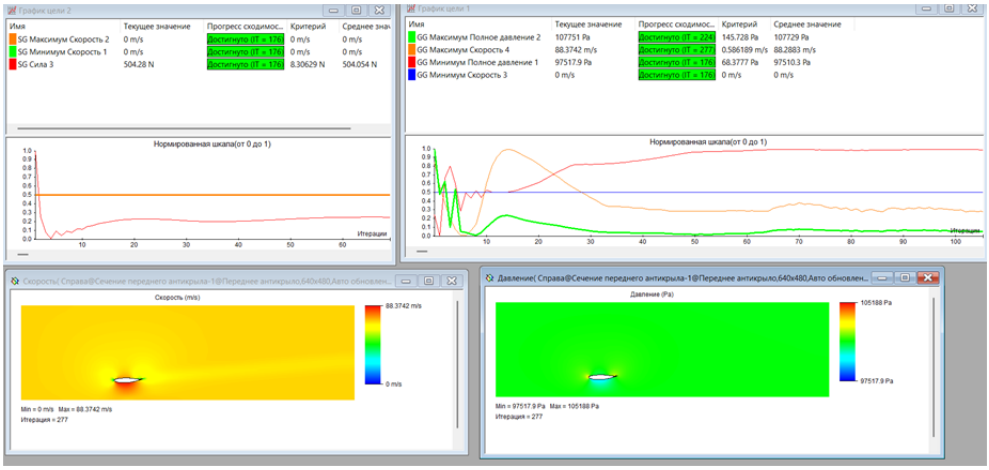


Рис. 5. Окно исследования при заданных целях

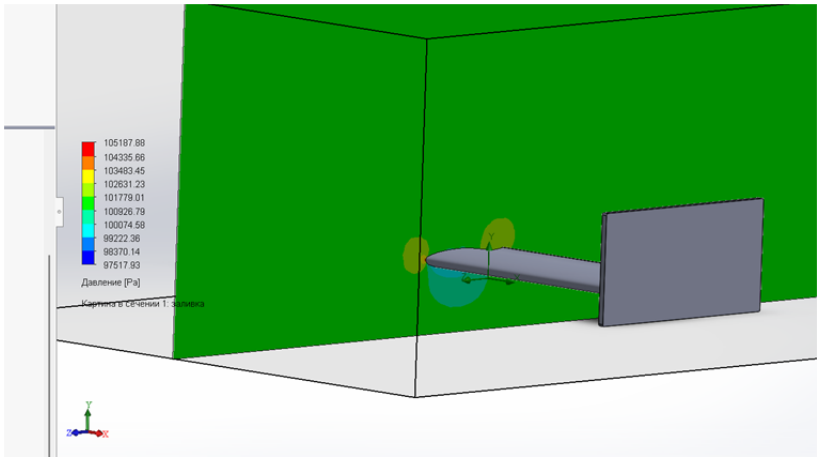


Рис. 6. Раздел «Картины в сечении» давление (вокруг антикрыла)

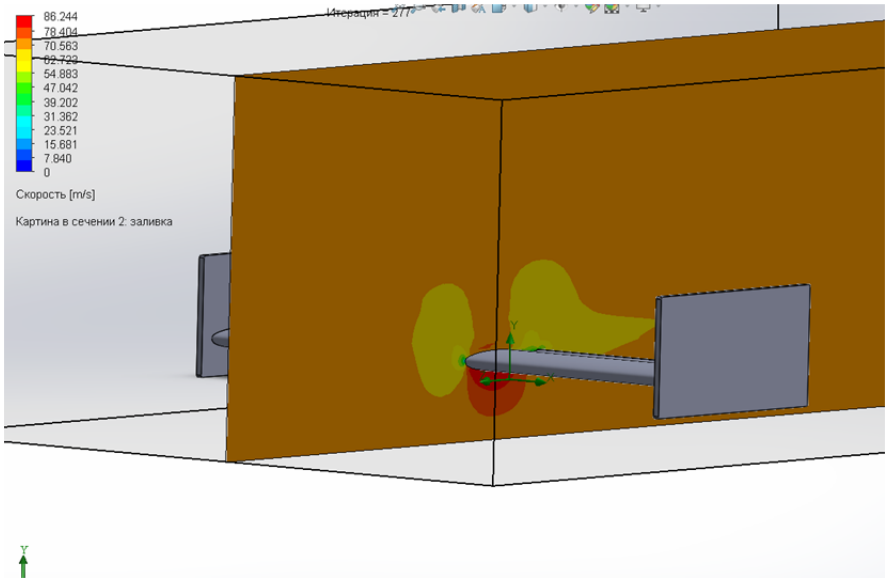


Рис. 7. Раздел «Картины в сечении» скорость воздуха

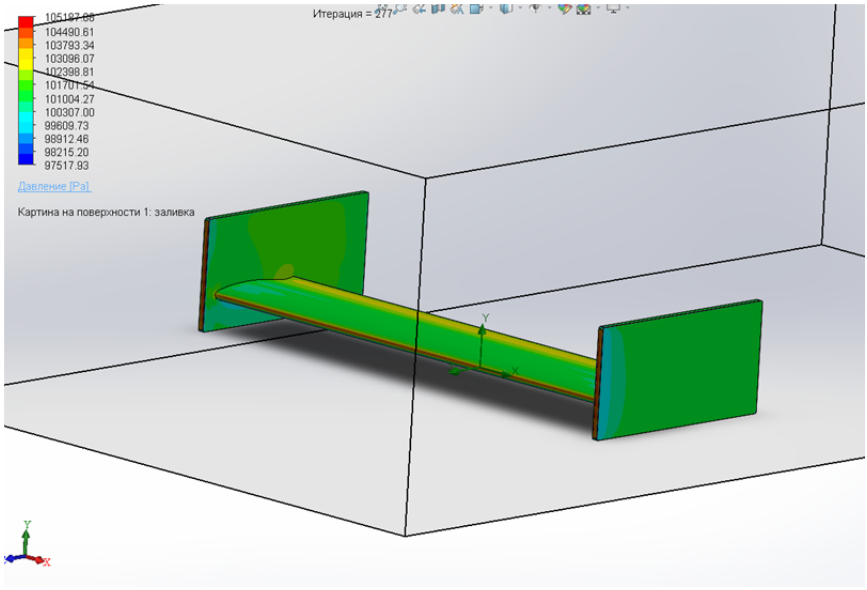


Рис. 8. Раздел «Картины на поверхности» давление (на антикрыло)

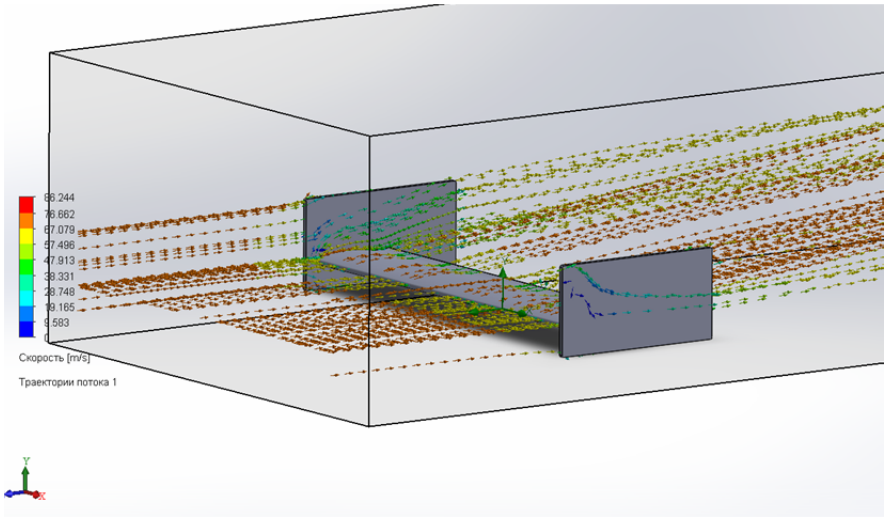


Рис. 9. Раздел «Траектории потока» скорость и траектория движения воздуха

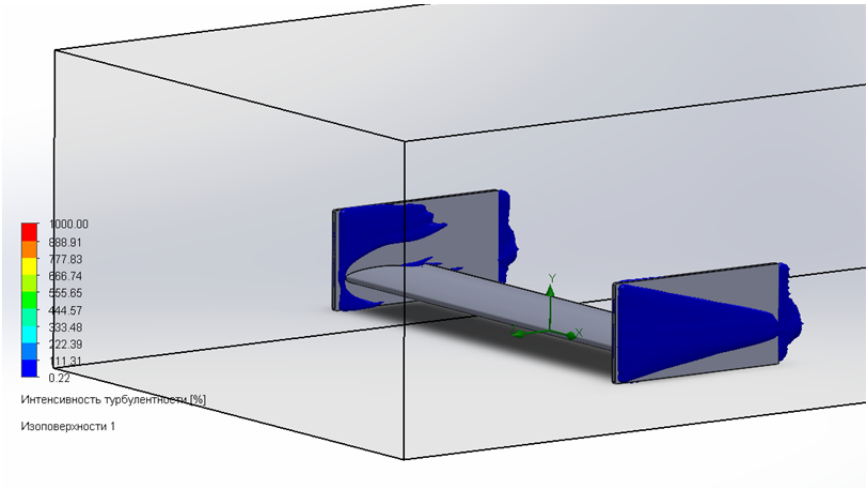


Рис. 10. Раздел «Изоповерхности» турбулентности вокруг антикрыла

Заключение. Полученные данные позволяют определить прижимную силу, с помощью закона Бернулли, и эффективность конструкции, что даст понимание как лучше спроектировать другие узлы болида, чтобы наиболее эффективно направить воздух для наименьшего сопротивления и расхода топлива [3, 4]. Расчет аэродинамики в SolidWorks можно производить не только для отдельных деталей, но и для болида в целом, причем на разных скоростях, таким образом следующим этапом является создание модели болида и его аэродинамический анализ. Полученные данные позволят учитывать прижимную силу болида Ф4 в дальнейших расчетах [5].

Список источников

[1] *Учимся правильно дуть в Solidworks flow simulation.* URL: https://3dtoday.ru/blogs/maniak26/learning-how-to-blow-in-solidworks-flow-simulation (дата обращения 20.10.2025).

[2] *2025 FIA Formula 4 — Technical regulations.* URL: https://api.fia.com/sites/default/files/2025_fia_formula_4_technical_regulations_-_issue_2_-_2024.12.11.pdf (accessed 01.10.2025).

[3] Долматовский Ю.А. *Автомобиль в движении.* URL: https://porschecarshistory.com/wp-content/old/biblio3/103/Avtomobil_dvizhenii.pdf (дата обращения 24.10.2025).

[4] Гухо В.-Г., ред. *Аэродинамика автомобиля.* Москва, Машиностроение, 1987, 100 с.

[5] Katz J. *Race car aerodynamics designing for speed.* URL: https://porschecarshistory.com/wpcontent/old/biblio/07/Race%20Car%20Aerodynamics%20-%20Joseph%20Katz%20-%201st%20Edition.pdf (accessed 24.10.2025).

The algorithm of aerodynamic calculation of a car in the SolidWorks (Flow Simulation) program

Grigoryev Stepan Dmitrievich m0bik18@yandex.ru
Plakhov Sergey Aleksandrovich sa.plahov@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article discusses the algorithm for calculating the aerodynamic performance of a Formula 4 front wing, such as the air flow velocity, pressure distribution, and air pressure around the wing, using the SolidWorks Flow Simulation software. These calculations help determine the effectiveness of the wing in different air flow conditions and identify areas where turbulence may occur.

Keywords: *aerodynamics, Formula-4, front wing, SolidWorks*

УДК 629.015

Активная и пассивная безопасность автомобиля: анализ эволюции и перспектив развития

Прокопов Григорий Сергеевич prokopov.grigoriy@yandex.ru
Тетерин Михаил Алексеевич teterinma@student.bmstu.ru
Голубина Светлана Александровна

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Прослежена эволюция автомобильных систем безопасности: от пассивных, смягчающих последствия ДТП, к активным, направленным на их предотвращение. Показано, что ключевым фактором аварий является ограниченность скорости человеческой реакции и некомпетентность водителя в случае аварии. Детально разобраны современные электронные системы активной безопасности, компенсирующие этот фактор и позволяющие кардинально снизить количество дорожных происшествий. Определено, что дальнейшее развитие связано с улучшением систем активной безопасности, их интеграцией в комплексные ассистенты водителя и переходом к полностью автономному управлению, что открывает новые горизонты для повышения безопасности на дорогах.

Ключевые слова: *активная безопасность, пассивная безопасность, системы курсовой устойчивости, краш-тест*

Широкое распространение автомобилей началось в 1920-х гг. благодаря конвейерной системе сборки, внедренной компанией Ford. Это привело к резкому росту числа автомобилей на дорогах. Статистика наглядно демонстрирует последствия увеличения автопарка: с 1910 по 1920 год в США в результате ДТП погибло 60 618 человек, в следующий десятилетний период (1920–1930) эта цифра достигла 200 121 человека. Рост составил 330 %, что значительно превысило 200 % роста автопарка (с 8,7 до 17,5 млн единиц) [1, 2]. Поскольку конструкция автомобиля постоянно совершенствовалась, а человеческие возможности оставались неизменными, растущая смертность стала стимулом для развития систем безопасности.

Человеческий фактор как ограничивающий параметр. Низкие скорости автомобилей на заре автопромышленности не предъявляли высоких требований к скорости реакции водителя [3]. С их ростом этот параметр стал критическим для выживания. Известно, что скорость реакции выбора человека при 10 заранее известных исходах составляет в среднем 620 миллисекунд. Однако в реальной дорожной обстановке нештатная ситуация возникает внезапно, из-за чего время реакции обычного водителя увеличивается до 1000–1500 миллисекунд [4].

Чтобы оценить, насколько этого времени недостаточно, рассмотрим упрощенную динамическую модель. Согласно государственному стандарту, краш-тесты проводятся на скорости 56 км/ч (≈15,6 м/с), так как это считает-

ся предельной скоростью для выживания при лобовом столкновении. Путь, который автомобиль проходит за время реакции водителя (1 с), составляет примерно 15,6 м. Этого расстояния уже недостаточно для полного избежания столкновения. Если же рассматривать лобовое столкновение двух автомобилей, движущихся с такой скоростью навстречу друг другу, их относительная скорость сложится, и ситуация станет катастрофической. Таким образом, неподготовленный водитель физически не способен адекватно и своевременно отреагировать на внезапную опасность, что и приводит к ДТП.

Эволюция систем безопасности: от пассивной к активной. Для противодействия этой проблеме были разработаны системы безопасности, которые делятся на две фундаментальные категории: пассивные и активные.

Пассивная безопасность нацелена на минимизацию последствий ДТП для человека, если его не удалось избежать. Изначально, в 1930-х годах, производители создавали автомобили с максимально жестким кузовом. Однако эта концепция была ошибочной: при столкновении жесткий кузов передавал почти всю кинетическую энергию водителю и пассажирам. Революцию совершил Бела Барени (Daimler-Benz AG), предложив концепцию зон деформации, она была направлена на то, чтобы кузов поглощал энергию удара, а не передавал ее людям. Другие его изобретения — травмобезопасный салон, складывающаяся рулевая колонка. Дальнейшим развитием пассивной безопасности стали ремни и подушки безопасности.

Однако возможности пассивной безопасности ограничены законами физики. При высокоэнергетических столкновениях (на скоростях свыше 70–80 км/ч) деформации кузова и возможностей силовой клетки может оказаться недостаточно для поглощения всей кинетической энергии.

Активная безопасность: предотвращение как приоритет. Системы активной безопасности действуют на опережение, предотвращая саму возможность ДТП путем стабилизации автомобиля.

Фундаментом для большинства современных систем стала АБС (Antilock Brake System). Разработанная изначально для авиации, она была адаптирована для автомобилей инженерами Daimler-Benz и Bosch. Первым серийным автомобилем с опциональной АБС стал Mercedes-Benz W116 в 1978 г., а с 1992 г. она стала стандартом для большинства новых автомобилей.

Более сложной и эффективной является система курсовой устойчивости (ESC/ESP). Она отслеживает соответствие фактической траектории автомобиля той, которую задает водитель рулем. При обнаружении отклонений (например, начала заноса или сноса) система притормаживает определенные колеса и/или снижает крутящий момент двигателя, чтобы вернуть автомобиль на нужную траекторию [5].

В основе работы ESC лежат несколько ключевых подсистем.

Антипробуксовочная система (TCS/ASR): борется с пробуксовкой ведущих колес при разгоне. Если система распознает проскальзывание, она либо притормаживает буксующее колесо, либо снижает крутящий момент двига-

теля, либо использует оба метода одновременно. Недостатком подхода, основанного только на торможении, является ухудшение динамики разгона.

Система активного распределения крутящего момента: эта более сложная и дорогая система решает ту же задачу, что и TCS, но иным способом. Вместо торможения она с помощью многодискового сцепления перераспределяет крутящий момент между ведущими колесами, направляя его на то колесо, которое имеет лучшее сцепление с дорогой. Это позволяет сохранить, а иногда и улучшить динамику разгона.

Технология «управления по проводам» (Steer-by-Wire): данная система радикально меняет принцип управления. Рулевая колонка и колеса не связаны механически. Датчики считывают угол поворота руля, а электроника, учитывая данные о скорости, заносе и т. д., задает оптимальный угол поворота колес. Таким образом, система не только выполняет команды водителя, но и активно их корректирует для предотвращения потери устойчивости.

Проведенный анализ показывает эволюцию систем безопасности: от пассивных, направленных на смягчение последствий, к активным, нацеленным на их предотвращение. Хотя пассивная безопасность остается незаменимым последним рубежом защиты, активная безопасность представляется более перспективным направлением. Ее развитие, основанное на электронике и искусственном интеллекте, позволяет компенсировать главный источник аварий — человеческий фактор, что в перспективе ведет к кардинальному снижению дорожно-транспортного травматизма.

Список источников

[1] *National Center for Statistics and Analysis. Traffic safety facts 2022: A compilation of motor vehicle traffic crash data.* URL: https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813656.pdf (дата обращения 20.10.2025).

[2] *Highway statistics summary to 1995*. URL: https://www.fhwa.dot.gov/ohim/summary95/ (дата обращения 20.10.2025).

[3] Nader R. *Unsafe at any speed. The designed-in dangers of the American automobile*. New York, Grossman Publishers Inc., 1965, 298 p.

[4] Леонтьев А.Н., ред. *Практикум по психологии*. Москва, Изд-во Московского университета, 1972, 248 с.

[5] Rajamani R. *Vehicle dynamics and control second edition*. New York, Springer Science + Business Media, 2012, 496 p.

Active and passive car safety: analysis of evolution and development prospects

Prokopov Grigory Sergeevich prokopov.grigoriy@yandex.ru
Teterin Mikhail Alekseevich teterinma@student.bmstu.ru
Golubina Svetlana Alexandrovna

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article traces the evolution of automotive safety systems: from passive ones that mitigate the consequences of accidents to active ones aimed at preventing them. It is shown that the key factor in accidents is the limited speed of human reaction and the incompetence of the driver in the event of an accident. Modern electronic active safety systems have been analyzed in detail to compensate for this factor and drastically reduce the number of road accidents. It is determined that further development is associated with the improvement of active safety systems, their integration into integrated driver assistants and the transition to fully autonomous control, which opens up new horizons for improving road safety.

Keywords: *active safety, passive safety, stability control systems, crash test*

Секция 8. Защита информации

УДК 004.056

Исследование методов мониторинга и контроля систем предотвращения утечек данных

Романов Вадим Николаевич roma.vadick@yandex.ru
Мазин Анатолий Викторович mazin@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

В условиях цифровой экономики защита конфиденциальной информации от несанкционированного распространения является критически важной задачей. Данная работа посвящена анализу методов мониторинга, обнаружения и предотвращения утечек данных, реализуемых современными системами предотвращения утечек информации (Data Loss Prevention, DLP). Рассмотрен комплексный подход к построению эффективной системы защиты информации, сочетающий сетевой и агентский контроль, интеллектуальный анализ контента и интеграцию в общую архитектуру безопасности организации.

Ключевые слова: *конфиденциальная информация, мониторинг данных, инциденты безопасности, блокировка доступа к данным, уведомление о безопасности, защита данных*

Информация представляет собой ключевой актив организации, а ее утечка ведет к значительным финансовым и репутационным потерям. Угрозы носят как внешний, так и внутренний характер, причем действия инсайдеров (умышленные или непреднамеренные) представляют особую опасность. Для противодействия им разработаны DLP-системы — программно-аппаратные комплексы, предназначенные для выявления, мониторинга и блокирования попыток несанкционированной передачи конфиденциальных данных за пределы контролируемого периметра.

Функционально DLP-система включает центральный сервер управления, сетевые шлюзы и агенты на конечных точках (рабочих станциях и серверах). Ее работа основана на двух классах методов: мониторинге и обнаружении утечек, а также их активном контроле и предотвращении.

Методы мониторинга и обнаружения утечек информации. Основой DLP-системы является точная идентификация конфиденциальной информации. Для этого применяется комбинация методов контентного и контекстного анализа [1]. Контентный анализ предполагает проверку содержимого данных. К его основным технологиям относятся:

– анализ по формальным признакам: поиск строк, соответствующих шаблонам (номера кредитных карт, паспортов, ИНН), с проверкой контрольных сумм для минимизации ложных срабатываний [2];

– метод точного совпадения (хеширование): сравнение хеш-сумм файлов с эталонной базой. Данный подход точен, но неэффективен против измененных документов [1];

– цифровые отпечатки (статические): создание уникального «отпечатка» документа на основе значимых элементов, что позволяет обнаруживать его измененные или перефразированные версии [1];

– лексический анализ: поиск ключевых слов и фраз. Часто используется в комбинации с другими методами для увеличения веса события;

– машинное обучение и стилометрия: распознавание стилистических и тематических особенностей корпоративных документов для выявления уникальной ценной информации [2].

Контекстный анализ отвечает на вопрос «Кто, куда, когда и как передает данные?». Он включает:

– анализ метаданных файла, атрибутов пользователя (роль, отдел) и объекта назначения (адрес получателя, тип ресурса);

– анализ поведенческих паттернов: формирование базового профиля нормальной активности пользователя и выявление существенных отклонений от него (аномалий) [2].

Различают две точки мониторинга за утечками конфиденциальной информации:

– сетевой уровень: глубокий анализ пакетов (SMTP, HTTP/S, FTP и др.) с помощью шлюзов [3];

– уровень конечных точек: наиболее всеобъемлющий контроль. Агенты на рабочих станциях перехватывают системные вызовы, что позволяет мониторить действия, не попадающие в сетевой трафик, а именно запись нажатий клавиш (кейлоггинг) и снимки экрана для расследования [2].

Методы контроля и предотвращения утечек. Обнаружение утечки дополняется активными мерами по ее пресечению на основе заранее определенных политик безопасности. На сетевом уровне: шлюз DLP в режиме реального времени может блокировать передачу, помещать данные в карантин для анализа администратором или проводить «очистку» (удаление конфиденциальных данных)/шифрование сообщения [3]. На уровне конечных точек: агенты физически блокируют запрещенные операции:

– контроль съемных носителей: детализированное управление на основе идентификации устройств (VID, PID, серийный номер), политик белого/черного списков и принудительного шифрования [3];

– контроль буфера обмена: блокировка или очистка буфера при попытке вставить данные в недоверенное приложение [1];

– контроль печати: блокировка задания печати или перенаправление на безопасный принтер с логированием и маркировкой водяными знаками;

– контроль беспроводных интерфейсов (Wi-Fi/Bluetooth): блокировка несанкционированных соединений;

– контроль приложений: блокировка запуска нежелательных программ (торренты, анонимайзеры) или их запуск в изолированной среде («песочнице») [2];

– психологический барьер и реагирование: система может оповещать пользователя о нарушении политики и одновременно отправлять уведомление администратору безопасности или в SOC для начала расследования [3].

Комплексный подход к построению DLP-системы. Идеальная DLP-система представляет собой не набор разрозненных средств, а интегрированную, динамичную и самообучающуюся платформу:

– всеобъемлющий гибридный контроль: комбинирование сетевого, агентского контроля и сканирования хранилищ для ликвидации «слепых зон»;

– интеллектуальный анализ контента: использование машинного обучения для автоматической классификации данных по степени конфиденциальности на основе их содержимого и контекста, что снимает нагрузку с пользователей по ручному назначению меток [4];

– адаптивное управление политиками: переход от статических правил к модели управления на основе рисков, учитывающей роль пользователя, конфиденциальность данных и контекст операции [2];

– визуализация и аналитика: наличие централизованных дашбордов, графиков и тепловых карт для наглядного отображения метрик безопасности, выявления тенденций и оперативного расследования инцидентов [5];

– интеграция и автоматизация: тесная интеграция с другими элементами инфраструктуры безопасности (SIEM, SOAR, IAM) для корреляции событий и автоматизации реагирования на инциденты [5].

Такой комплексный подход позволяет не только предотвращать утечки данных, но и обеспечивать прозрачность бизнес-процессов и соблюдение регуляторных требований, являясь критически важным элементом системы безопасности организации в цифровую эпоху.

Список источников

[1] Харитонов С.В. Основные драйверы и тенденции развития DLP-систем в Российской Федерации. *Прикладная информатика*, 2020, т. 15, № 3(87), с. 75–90.

[2] *Staffcop Enterprise. Методы контроля сотрудников — топ 3 DLP-системы.* URL: https://gendalf.ru/news/security/dlp-garantiya-zashchity-vashikh-dannykh (дата обращения 10.09.2025).

[3] *Hymn_of_the_fotstborn. DLP от базовых настроек до продвинутой аналитики.* URL: https://www.anti-alware.ru/analytics/Technology_Analysis/DLP-Integration (дата обращения 13.09.2025).

[4] Полякова А. *Что такое DLP-система и для чего она используется?* URL: https://bitcop.ru/monitoring/dlp-sistemy (дата обращения 15.09.2025).

[5] Дрозд А.В. и др. *Основы аналитики в DLP-системах. Программный комплекс «КИБ СерчИнформ».* Москва, Горячая линия-Телеком, 2025.

Research of methods of monitoring and control of data leak prevention systems

Romanov Vadim Nikolaevich roma.vadick@yandex.ru
Mazin Anatoly Viktorovich mazin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

In the digital economy, protecting confidential information from unauthorized distribution is a critical task. This work is devoted to the analysis of methods for monitoring, detecting and preventing data leaks implemented by modern information leak prevention systems (DLP). An integrated approach to building an effective information security system is considered, combining network and agent control, intelligent content analysis and integration into the overall security architecture of the organization.

Keywords: *confidential information, data monitoring, security incidents, data access blocking, security notification, data protection*

УДК 004.056

Исследование методов мониторинга действий пользователей

Заломов Кирилл Андреевич kirill.zalomov@gmail.com
Лачихина Анастасия Борисовна lachikhinaab@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены современные методы мониторинга действий пользователей в информационных системах. Представлен обзор программных и аппаратных решений, а также аналитических подходов для выявления аномалий в поведении. Показано, что комплексный мониторинг способствует повышению безопасности и снижению рисков утечек и злоупотреблений. Сделаны выводы о необходимости интеграции машинного обучения и комплексного анализа для более точного обнаружения угроз и оптимизации процессов защиты.

Ключевые слова: *мониторинг действий пользователей, информационная безопасность, системы контроля, анализ поведения, обнаружение аномалий*

Современные информационные системы требуют эффективных методов защиты, поскольку пользователи могут представлять как ресурс, так и источник угрозы для безопасности. Мониторинг действий пользователей стал важным элементом предотвращения инцидентов, выявления несанкционированных действий и контроля за соблюдением правил.

Актуальность исследования обусловлена ростом угроз информационной безопасности внутреннего характера и увеличением объемов данных, которые необходимо контролировать.

Цель исследования — обзор и анализ методов мониторинга действий пользователей, выявление преимуществ и ограничений существующих подходов. Задачи включают классификацию методов, описание используемых инструментов, оценку применяемости различных техник в практических условиях.

Методы мониторинга действий пользователей. Мониторинг основывается на сборе и анализе данных о поведении пользователя в системе. Типичные методы включают:

– логирование системных и прикладных событий. Логирование составляет основу мониторинга, обеспечивая регистрацию дискретных событий: аутентификации, доступа к ресурсам и выполнения операций [1]. Данный подход формирует ретроспективную базу для последующего анализа инцидентов и аудита безопасности;

– запись сессий рабочего времени. За счет записи сессий рабочего времени достигается более глубокий уровень наблюдения через фиксацию непрерывной последовательности действий пользователя. Метод включает визуальную активность (например, запись экрана) и операции ввода, однако его применение требует учета правовых аспектов конфиденциальности;

– анализ сетевого трафика обеспечивает независимый канал наблюдения, ориентированный на выявление подозрительных паттернов поведения. Мониторинг метаданных и содержимого сетевых пакетов позволяет обнаруживать аномальные потоки данных [2], свидетельствующие о потенциальной эксфильтрации информации или несанкционированных соединениях;

– контроль доступа и изменения файлов. Данный метод направлен на обеспечение целостности и конфиденциальности данных через аудит операций с файловой системой. Метод позволяет выявлять несанкционированные модификации, попытки массового копирования или удаления информации;

– использование систем мониторинга активности пользователей (User Activity Monitoring, UAM). Применение подобных систем позволяет объединить перечисленные методы сбора данных в единую платформу [3]. UAM-системы обеспечивают корреляцию событий из разнородных источников и предоставляют консолидированные инструменты анализа поведения пользователей.

Современные подходы также используют алгоритмы машинного обучения для выявления аномалий в поведении [4]. В отличие от сигнатурных методов, данные алгоритмы формируют поведенческий базис для каждого пользователя, что расширяет возможности обнаружения инсайдерских угроз и нетипичных действий через проактивное выявление поведенческих отклонений.

Результаты и их обсуждение. Эффективная реализация любого из ранее перечисленных методов требует нахождения баланса между глубиной контроля, ресурсными затратами и правовыми ограничениями. Решения, обеспечивающие детальный мониторинг (такие как запись сеансов или глубокая проверка сетевых пакетов), предъявляют высокие требования к производительности систем и объемам хранилищ данных. Таким образом, построение системы мониторинга невозможно без комплексного подхода, который сочетает в себе несколько взаимодополняющих технологий и аналитических методов, что позволяет распределить нагрузку и минимизировать риски.

Заключение. Таким образом, современные методы мониторинга действий пользователей образуют комплексную систему защиты, где различные подходы — от базового логирования до записи сеансов работы — взаимно дополняют друг друга. Ключевой тенденцией является интеграция этих методов в единые платформы, позволяющие не только фиксировать отдельные события, но и анализировать их в взаимосвязи, выявляя сложные поведенческие паттерны. Перспективы развития связаны с созданием более адаптивных систем анализа, способных динамически оценивать контекст действий пользователя и формировать упреждающие реакции на потенциальные угрозы. Такой комплексный подход позволяет перейти от простого документирования инцидентов к их активному предупреждению, что значительно повышает уровень информационной безопасности организации.

Список источников

[1] *Мониторинг информационной безопасности — основа защиты данных.* URL: https://esapro.ru/blog/monitoring-informatsionnoy-bezopasnosti/ (дата обращения 15.05.2024).

[2] *Обнаружение аномалий в данных временных рядов с помощью статистических методов.* URL: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/919248/ (дата обращения 19.05.2024).

[3] *Контроль действий пользователей: что это такое, зачем необходимо.* URL: https://rt-solar.ru/products/solar_safeinspect/blog/5699/ (дата обращения 19.05.2024).

[4] *Информационная безопасность (тренды).* URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Главные_тенденции_в_защите_информации (дата обращения 20.05.2024).

Research of methods for monitoring user actions

Zalomov Kirill Andreevich kirill.zalomov@gmail.com
Lachikhina Anastasia Borisovna lachikhinaab@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

Modern methods of monitoring user actions in information systems are considered. An overview of software and hardware solutions, as well as analytical approaches for detecting anomalies in behavior, is presented. It has been shown that comprehensive monitoring helps to increase security and reduce the risks of leaks and abuse. Conclusions are drawn about the need to integrate machine learning and complex analysis for more accurate threat detection and optimization of protection processes.

Keywords: *monitoring user actions, information security, control systems, behavior analysis, anomaly detection*

УДК 004.622

Методы формирования датасетов на русском языке для оценки систем генерации дополненной поиском

Тронов Кирилл Александрович **kirtron@mail.ru**
Мазин Анатолий Викторович **mazinav@yandex.ru**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены методы формирования датасетов на русском языке для оценки систем генерации дополненной поиском, включая перевод англоязычных ресурсов, ручной отбор и синтетическую генерацию с использованием фреймворков и больших языковых моделей. Выведены общие правила формирования датасетов, учитывающие лингвистические особенности русского языка. Даны практические рекомендации по созданию датасетов, включая применение локальных инструментов для обеспечения приватности. Сделаны выводы о том, что гибридный подход, комбинирующий синтетическую генерацию и ручную курацию дает наибольший эффект.

Ключевые слова: *датасеты, русский язык, RAG-оценка, синтетическая генерация, локальная обработка*

В контексте оценки систем генерации дополненных поиском, где внешние знания интегрируются с генеративными моделями, формирование датасетов на русском языке представляет особый вызов из-за относительной скудности ресурсов по сравнению с английским. Для оценки RAG-систем на русском языке, с учетом его гибкого порядка слов, падежей и родов, необходимо уделять особое внимание тестированию способности системы обрабатывать перефразированные вопросы и ответы. Такая проверка называется оценкой на семантическую робастность или парафразную инвариантность. Для этого датасет наполняется перефразированными вопросами, а затем оценивается, сохраняет ли RAG консистентность ответов. Датасеты должны включать минимум три компонента: вопросы, контексты и эталонные ответы. Вопросы бывают четырех типов: фактологические, суммирующие, рассуждающие, неотвечаемые (проверяют способность системы отказываться от ответа). Для точной оценки RAG датасет должен включать разнообразные типы вопросов. Например, в доменно-специфических приложениях считается оптимальной такая пропорция: 40 % фактологических, 30 % суммирующих, 20 % рассуждающих и 10 % неотвечаемых для выявления слабостей.

Выбор данных зависит от целей оценки. Для проверки общих способностей RAG подходят публичные ресурсы и переводы, покрывающие широкий спектр тем. Однако для внутренних или доменно-специфических задач нужны специальные датасеты, так как публичные бенчмарки отличаются по словарю, стилю и формату запросов. Существует несколько подходов к созданию таких датасетов, каждый из которых можно выполнять как с использованием облачных сервисов, так и локально с целью сохранения конфиденциальности.

1. Перевод и адаптация англоязычных датасетов. Перевод устоявшихся англоязычных датасетов — практичный способ для быстрого набора данных для оценки RAG. При этом можно использовать традиционные системы машинного перевода либо современные большие языковые модели, в том числе и локальные. Существуют готовые профессионально переведенные датасеты, например, SberQuAD — крупный аналог Stanford SQuAD на русском (≈50 000 Q&A) [1].

2. Генерация синтетических данных. Это автоматизированный процесс создания датасетов с использованием LLM для извлечения QA-пар из локальных документов. Генерация датасета через LLM может происходить разными способами с точки зрения доступа к LLM:

– вручную через веб-интерфейс облачных сервисов в режиме «Общения» с документов или через запросы вида «Сформируй вопросы и ответы по этому документу»;

– через API облачных сервисов как более автоматизированный подход;

– через локальные LLM, которые дают полный контроль и сохранность данных, но могут проигрывать в качестве облачным вариантам.

Существуют три ключевых метода генерации, которые могут применяться в том числе и локально (для достижения наилучшего результата рекомендуется использовать пост-фильтрацию [2]):

– простая промпт-генерация: базовый метод, где LLM генерирует вопросы из контекста с одним промптом. Документы сегментируются (~ 2000 токенов), LLM генерирует вопросы по контексту. Но такой подход дает 95 % фактологических вопросов и низкое разнообразие, что можно улучшить фильтрацией критик-агентами (метрики groundedness, relevance >=4);

– извлечение утверждений (Statement Extraction): шаги: (1) определить тему; (2) извлечь 5 фактов; (3) сформировать суммирующие или рассуждающие утверждения; (4) генерировать вопрос по случайному утверждению. Это повышает разнообразие, генерируя до 75 % суммирующих и 38 % рассуждающих вопросов [2];

– эволюционная генерация (Evol-Instruct), где вопросы усложняются итеративно (добавление мультиконтекста), с фильтрацией для качества.

Файнтюнинг моделей генерации с использованием LoRA на доменно-специфическом наборе данных может дополнительно повысить качество генерации датасета. Тренировка: метка + контекст → вопрос + ответ [3]. Также важно отметить, что для создания русскоязычных датасетов предпочтительны дообученные модели (T-pro/t-lite, GigaChat), но бенчмарк MERA показывает, что недообученные мультиязычные модели иногда превосходят их [4]. Рекомендуется выбирать модель по рейтингу MERA или проводить оценку самостоятельно на валидационном датасете этого бенчмарка для локально дообученных моделей.

Появляются специализированные фреймворки для автоматической генерации синтетических QA-пар, полезные для RAG-систем. RAGEval автомати-

зирует генерацию QA-пар для конкретных сценариев, используя LLM для создания документов, вопросов и референсов из схем [5].

3. Ручная аннотация. Для обеспечения высокой точности оценки языковых моделей в критичных областях применяется ручная аннотация: формирование курированных тестовых наборов из реальных данных (логов, документов) с аннотацией релевантных источников и включением edge-кейсов. Источниками набора данных, в том числе могут служить российские форумы и порталы с Q&A (например, StackOverflow на русском для технических доменов) или анкеты/FAQ по специфическим темам. Главное — структурировать их в виде пар «вопрос–ответ». Особое внимание при данном подходе стоит уделить вопросам, направленным на стресс-тестирование (инъекции, jailbreaks) системы. Этот метод является основным способом генерации неотвечаемых вопросов для датасета. Также ручная аннотация хорошо дополняет предыдущие подходы, добавляя валидацию синтетики и переводов экспертами.

Однако лучший локальный датасет для доменно-специфических задач — это комбинация методов [6]:

– 70 % синтетика (для широкого покрытия);

– 20 % эволюционная генерация (для тестирования сложных рассуждений и multi-hop запросов);

–10 % ручная аннотация (для проверки самых важных сценариев и пограничных случаев).

Формирование эффективных датасетов для оценки RAG-систем на русском языке требует комбинации методов. Наиболее перспективными являются синтетическая генерация с извлечением утверждений и эволюционным усложнением, дополненная ручной курацией критических сценариев. Локальная реализация обеспечивает безопасность корпоративных данных без потери качества оценки.

Список источников

[1] Efimov P., Chertok A., Boytsov L., Braslavski P. *SberQuAD — Russian Reading Comprehension Dataset: Description and Analysis.* URL: https://arxiv.org/pdf/1912.09723 (accessed 19.05.2024).

[2] *Hugging Face Open-Source AI Cookbook: RAG Evaluation.* URL: https://huggingface.co/learn/cookbook/rag_evaluation (accessed 22.10.2025).

[3] Lima R.T., Gupta S., Berrospi C., Mishra L., Dolfi M., Staar P.W., Paris-Saclay P.V., Zurich I.R. *Know Your RAG: Dataset Taxonomy and Generation Strategies for Evaluating RAG Systems.* URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388245719312799?via%3Dihub (accessed 22.10.2025).

[4] *MERA: Benchmark for Russian Language Models.* URL: https://mera.a-ai.ru/ru/text (accessed 22.10.2025).

[5] Zhu K., Luo Y., Xu D., Wang R., Yu S., Wang S., Yan Y., Liu Z., Li Y., Han X., Liu Z., Sun M. *RAGEval: Scenario Specific RAG Evaluation Dataset Generation Framework.* URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10118-026-3586-9 (accessed 22.10.2025).

[6] Tian C.X., Xie W., Chen Z., Yi Z., Liu H., Li H., Wang S., Ma S. *Domain-Specific Data Generation Framework for RAG Adaptation.* URL: https://arxiv.org/abs/2510.11217 (accessed 22.10.2025).

Methods for generating Russian-language datasets for evaluating retrieval-augmented generation systems

Tronov Kirill Alexandrovich kirtron@mail.ru
Mazin Anatoly Viktorovich MazinAV@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This article examines methods for generating Russian-language datasets for evaluating retrieval-augmented generation systems, including translation of English-language resources, manual curation, and synthetic generation using frameworks and large language models. General rules for dataset formation are developed, taking into account the linguistic characteristics of the Russian language. Practical recommendations for dataset creation are provided, including the use of local tools to ensure privacy. It is concluded that a hybrid approach combining synthetic generation and manual curation yields the greatest results.

Keywords: *datasets, Russian language, RAG evaluation, synthetic generation, local processing*

УДК 004.056

Разработка и исследование методов детектирования виртуальных сред для анализа защищенности программного обеспечения

Семенкин Александр Сергеевич sas21ki222@student.bmstu.ru
Лачихина Анастасия Борисовна lachikhinaab@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследованы методы детектирования виртуальных машин, важные для анализа защищенности программного обеспечения. Проанализированы аппаратные, программные и поведенческие методы. Анализ состояния гонки с использованием барьеров памяти показал высокую устойчивость к маскировке. Метод измерения эффективности барьеров памяти позволяет идентифицировать виртуальную среду и может использоваться для оценки защищенности коммерческого ПО.

Ключевые слова: *детектирование виртуальных машин, информационная безопасность, анализ защищенности, барьеры памяти, состояние гонки, гипервизор*

Современная кибербезопасность характеризуется постоянным противоборством создателей систем защиты и злоумышленников. Виртуальные машины стали стандартным инструментом для анализа вредоносного ПО, тестирования уязвимостей и обратной разработки. В связи с этим способность программного обеспечения определять факт работы в виртуальной среде стала критически важной для оценки эффективности средств защиты.

Целью работы является систематизация, анализ и практическая проверка эффективности современных методов детектирования виртуальных машин. Для ее достижения решались следующие задачи: классификация существующих методов, сравнительный анализ их эффективности, разработка и экспериментальная проверка поведенческого метода, основанного на анализе состояния гонки.

В работе применялись методы системного анализа для классификации подходов к детектированию [1]. Были выделены три основные группы методов: аппаратные (анализ MAC-адресов, идентификаторов процессора, системных таблиц), программные (анализ процессов, реестра, файловой системы) и поведенческие (тайминговые атаки, анализ системных вызовов, состояние гонки) [2]. Для детального исследования поведения многопоточных приложений в различных средах выполнения был разработан комплексный метод анализа состояния гонки (race condition) при конкурентном доступе к разделяемым переменным. Методология основана на сравнительном анализе эффективности механизмов синхронизации в нативных и виртуализированных средах, что позволяет выявить фундаментальные различия в архитектуре управления памятью и планирования потоков [3].

Для обеспечения репрезентативности результатов была развернута многоуровневая тестовая среда. На физическом уровне использовалась рабочая станция с процессором Intel Core i5-12400, 32 ГБ оперативной памяти DDR4 и накопителем NVMe Samsung 980 Pro. Виртуальная инфраструктура включала VMware Workstation Pro 17.0 с различными конфигурациями гостевых систем: Windows Server 2019 Standard, Ubuntu Server 22.04 LTS и CentOS Stream 9. Код написан на языке C++ для фиксирования более точных показателей при работе с операционной системой в сравнении с другими языками. Компиляция кода производилась с помощью утилиты msys2, один из самых популярных компиляторов с открытым исходным кодом.

Результаты эксперимента демонстрируют парадоксальную картину. При использовании обычной реализации без синхронизации разница между физической и виртуальной средой оказалась статистически незначимой — в обоих случаях наблюдалась потеря примерно 12–15 % операций инкремента из-за состояния гонки. Однако при внедрении барьеров памяти выявились фундаментальные различия [4]. На физическом оборудовании использование полного барьера памяти (_mm_mfence()) увеличивало потери до 70 %, в то время как в виртуальной среде VMware эффективность барьеров не превышала 8–10 %, операции выполнялись без потерь в эффективности.

Практическое тестирование показало, что многие простые методы (анализ тактовых циклов) неэффективны из-за постоянного совершенствования гипервизоров. Однако разработанный поведенческий метод, основанный на измерении разницы в количестве исполнений в многопоточности с использованием барьеров памяти, показал высокую эффективность. На физическом оборудовании барьеры памяти значительно снижали количество ошибок синхронизации, в то время как в виртуальной среде гипервизор нивелировал их эффект, что является следствием оптимизации и сериализации доступа к памяти. Данный метод продемонстрировал надежность детектирования на уровне 95 %.

Проблема детектирования виртуальных сред остается актуальной и требует комплексного подхода. Наиболее устойчивыми к маскировке являются поведенческие методы, в частности анализ работы барьеров памяти в условиях состояния гонки. Разработанный метод позволяет с высокой вероятностью идентифицировать виртуальную среду и может быть интегрирован в системы защиты коммерческого программного обеспечения для анализа его защищенности. Перспективы дальнейших исследований связаны с применением машинного обучения для анализа поведенческих паттернов и адаптацией методов для контейнерных и облачных сред.

Список источников

[1] Garfinkel T., Rosenblum M. A Virtual Machine Introspection Based Architecture for Intrusion Detection. *Proceedings of the 10th Annual Network and Distributed System Security Symposium*, 2003, pp. 191–206.

[2] *VMAware: Advanced Virtual Machine Detection.* URL: https://github.com/kernelwernel/VMAware (accessed 10.05.2024).

[3] Raffetseder T., Krugel C., Kirda E. Detecting System Emulators. *Information Security*, 2007, vol. 4779, pp. 1–18. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75496-1_1

[4] Аверченков В.И., Малахов Ю.А. *Основы научного творчества.* Брянск, БГТУ, 2012, 156 с.

Development and research of virtual environment detection methods for software security analysis

Semyonkin Alexander Sergeevich sas21ki222@student.bmstu.ru

Lachikhina Anastasia Borisovna lachikhinaab@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The study examines virtual machine detection methods essential for software security analysis. Hardware, software, and behavioral methods were analyzed. Race condition analysis using memory barriers demonstrated high resistance to masking. The developed method for measuring memory barrier effectiveness reliably identifies virtual environments and can be applied to commercial software security assessment.

Keywords: *virtual machine detection, information security, security analysis, memory barriers, race condition, hypervisor*

УДК 004.056

Информационная безопасность в эпоху deepfake-атак

Цайкина Мария Юрьевна tsaykinamyu@student.bmstu.ru
Потапов Алексей Вячеславович potapov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены технологии создания и распространения deepfake-ов в современном цифровом пространстве. Deepfake представляет собой синтетический медиаконтент, создаваемый с использованием методов глубокого обучения искусственного интеллекта и обладающий высокой степенью реализма. Представлены основные виды угроз, связанных с применением данной технологии. Описаны методы идентификации deepfake-ов через визуальный анализ и специализированное программное обеспечение, а также предложены практические меры защиты от подобных атак.

Ключевые слова: *deepfake, синтетический медиаконтент, глубокое обучение, информационная безопасность*

Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта привело к появлению мощных инструментов для создания убедительных фальсификаций и массового распространения дезинформации. Повышенная реалистичность синтетического медиаконтента, известного как deepfake, порождает серьезные угрозы: от шантажа и компрометации репутации личности до дестабилизации общественного порядка.

Терминология deepfake этимологически происходит от соединения понятий deep learning — глубокое обучение, обозначающее совокупность методов машинного обучения, основанных на создании представлений данных, и fake — подделка, характеризующая искажение или фальсификацию информации. Deepfake — создание синтетических медиаданных с применением технологий искусственного интеллекта, при которых происходит наложение одного фрагмента на другой с высокой степенью реализма. Вследствие этого визуальное или аудиальное различие между синтезированным контентом и оригинальным материалом зачастую становится неразличимым для человеческого восприятия [1].

Основные угрозы распространения deepfake-ов [2]:

– политическая дестабилизация — технологии синтетических медиа предоставляют инструменты для создания убедительных фальсификаций заявлений политических деятелей, что приводит к дезинформации и манипулированию общественным мнением;

– угрозы для бизнеса и финансов — deepfake-технологии создают условия для реализации атак, нацеленных на финансовый и репутационный ущерб компаниям;

– риски для цифровых платформ — социальные сети становятся основным каналом распространения фальсификаций, что приводит к росту судебных исков и репутационных потерь для платформ;

– угрозы для правосудия и безопасности — deepfake-технологии способствуют фальсификации доказательств и компрометации биометрических данных, что усложняет процесс установления истины в уголовных расследованиях и повышает риск использования ложных алиби.

Для распознания deepfake-контента применяются аналитические и технологические подходы. Первоначальная оценка может осуществляться пользователем путем наблюдения за физиологическими аномалиями: неестественной мимикой, асинхронной артикуляцией, нерегулярным морганием, а также визуальными несоответствиями в освещении, оттенках кожи, падений теней и детализации изображения. Однако, учитывая быструю эволюцию технологий и высокое качество современных подделок, аналитического анализа часто оказывается недостаточно. Поэтому актуализируется использование специализированных программных средств, которые анализируют изображения и видео на предмет незначительных искажений, возникающих в процессе создания синтетического контента, выявляя тонкие несоответствия.

Распознание аудиодипфейков без специализированных инструментов практически невозможно. Ученые предлагают метод [3], основанный на анализе физиологических ограничений голосового аппарата человека. Искусственный интеллект, генерирующий речь, зачастую игнорирует анатомические особенности, что может проявляться в воспроизведении звуков, физически невозможных для человеческой гортани [4].

Меры защиты от deepfake-атак [5]:

– ограничивайте доступ к личным фото и видео в социальных сетях;

– проводите верификацию критически важных запросов по альтернативным каналам связи;

– используйте надежные и уникальные пароли, регулярно их обновляйте;

– внедряйте двухфакторную аутентификацию для всех онлайн-аккаунтов;

– своевременно обновляйте программное обеспечение и операционные системы;

– обучайте персонал и повышайте цифровую грамотность для распознавания deepfake-атак.

Эволюция deepfake-технологий происходит беспрецедентно быстрыми темпами. По мере совершенствования методов создания синтетического контента разработчики систем распознавания вынуждены постоянно адаптировать свои алгоритмы, что создает своеобразную «гонку вооружений» между создателями и детекторами подделок. Поддержание эффективного уровня защиты требует непрерывных научных исследований, разработки новых моделей машинного обучения и обмена опытом между экспертами. Без постоянного развития и внедрения инновационных решений, возможности распознавания deepfake-ов могут быстро устаревать, открывая новые возможности для злоумышленников и усугубляя существующие угрозы для информационной безопасности и общественного порядка.

Список источников

[1] *Deepfake в условиях современности: что, почему и возможно ли защититься?* URL: https://habr.com/ru/companies/first/articles/707246/ (дата обращения 29.10.2025).

[2] Игнатьев А.Г., Курбатова Т.А. *Дипфейки в цифровом пространстве: основные международные подходы к исследованию и регулированию.* Москва, АНО «Центр компетенций по глобальной ИТ-кооперации», 2023, 54 с.

[3] *Deepfake audio has a tell and researchers can spot it.* URL: https://arstechnica.com/information-technology/2022/09/researchers-use-fluid-dynamics-to-spot-deepfake-voices/ (accessed 31.11.2025).

[4] *DeepFake: как распознать и как защититься.* URL: https://www.sberbank.ru/ru/person/kibrary/articles/deepfake-kak-raspoznat-i-kak-zashchititsya (дата обращения 31.10.2025).

[5] *Дипфейки и поддельные видео — как защититься?* URL: https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/protect-yourself-from-deep-fake (дата обращения 02.10.2025).

Information security in the era of deepfake attacks

Tsykina Maria Yurievna tsaykinamyu@student.bmstu.ru
Potapov Alexey Vyacheslavovich potapov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The technologies of creating and distributing deepfakes in the modern digital space are considered. Deepfake is a synthetic media content created using deep learning methods of artificial intelligence and possessing a high degree of realism. The main types of threats associated with the use of this technology are presented. Methods for identifying deepfakes through visual analysis and specialized software are described, as well as practical protection measures against such attacks are proposed.

Keywords: *deepfake, synthetic media content, deep learning, information security*

УДК 004.94

Вредоносное программное обеспечение на базе искусственного интеллекта: анализ возможностей и угроз

Попова Софья Станиславовна **popovass@student.bmstu.ru**
Потапов Алексей Вячеславович

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен комплексный анализ современных киберугроз, созданных на базе технологий искусственного интеллекта. Рассмотрены механизмы работы и ключевые характеристики таких угроз, включая фишинговых агентов на основе больших языковых моделей, вредоносы, использующие генеративно-состязательные сети, и автономные адаптивные ботнеты. Показана принципиальная неэффективность традиционных систем защиты, основанных на сигнатурном анализе и статических правилах, против новых адаптивных угроз. Сделан вывод о необходимости разработки проактивных многоуровневых защитных систем, сочетающих методы состязательного машинного обучения, анализ сложных семантических признаков и гибридные подходы к обнаружению. Полученные результаты могут быть применены для создания комплексных систем кибербезопасности следующего поколения и формирования адекватной нормативно-правовой базы, регулирующей разработку и применение технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, кибербезопасность, вредоносное программное обеспечение, генеративные сети, большие языковые модели*

Искусственный интеллект — один из ведущих трендов в развитии современных цифровых технологий. Сферы его применения расширяются по мере усовершенствования, что кроет в себе не только значимый прогресс, но и угрозу. В связи с проникновением технологий искусственного интеллекта в арсенал киберпреступников, традиционные угрозы теперь уступают место новому поколению вредоносного программного обеспечения, обладающему способностью к обучению и адаптации.

Основные виды применения технологий искусственного интеллекта. Фишинговые агенты на базе LLM (Large Language Model) — это вредоносные системы, которые используют большие языковые модели для автоматизации и усовершенствования социальной инженерии. Они генерируют персонализированные фишинговые письма, сообщения или веб-сайты, которые практически неотличимы от настоящих, так как способны анализировать публичные данные жертвы для создания убедительного контента [1]. Известный пример — WormGPT, основанный на языковой модели GPT-J. Благодаря неограниченной поддержке символов, сохранению памяти чата и возможностям форматирования кода этот опасный инструмент представляет значительную угрозу для отдельных лиц и организаций [2].

Вредоносы, использующие GAN (Generative Adversarial Networks), — программное обеспечение, которое способно непрерывно изменять исполняемый код. Это позволяет ему сохранять функциональность, но постоянно менять сигнатуру, делая бесполезными традиционные антивирусы, основанные на сигнатурном анализе. Эта же технология лежит в основе для атак на системы ИИ-безопасности: существуют специализированные программы, целью которых являются не сама система жертвы, а системы защиты. Они используют технику состязательных атак (Adversarial Attacks) — вносят небольшие целенаправленные изменения во вредоносный код, которые заставляют модель ИИ классифицировать активность как легитимную [3]. Рассмотрим принцип работы на примере MalGAN. Модель состоит из двух ключевых компонентов: генератора и детектора. Заранее известен только набор анализируемых признаков (например, перечень API-вызовов), но полностью скрыты внутренняя архитектура модели-жертвы и параметры обучения. Генератор принимает на вход вектор шума (z) и вектор признаков вредоносного ПО (m), и генерирует новые признаки на его основе. Его цель — создавать примеры, которые дискриминатор впоследствии не сможет отличить от настоящих. Дискриминатор получает как реальные, так и сгенерированные данные и пытается определить, являются ли они подлинными или искусственными (созданными генератором). Оба компонента работают вместе, чтобы создать такую версию вредоносной программы, которую целевая система обнаружения угроз сочтет за легитимную. Ключевое преимущество MalGAN заключается в динамической адаптивной генерации состязательных примеров на основе обратной связи от защитной системы [4].

Автономные ботнеты — сети зараженных устройств, управляемые центральным сервером, который использует алгоритмы машинного обучения (ML) или обучения с подкреплением (RL) для координации атак. Такие ботнеты могут автономно анализировать эффективность различных векторов атаки, перераспределять ресурсы, выбирать наиболее уязвимые цели и адаптировать свое поведение для уклонения от обнаружения. Наиболее частые сценарии их использования — рассылка спама, перебор паролей на удаленной системе, атаки на отказ в обслуживании (DoS- и DDoS-атаки), вымогательство и другие [5].

Очевидно, что для нового класса атак традиционные подходы к обеспечению безопасности, основанные на мониторинге поведения и обнаружении на основе сигнатур, являются неактуальными. Основная защита от вредоносного ПО на базе технологий искусственного интеллекта, согласно исследованию [6], строится на создании устойчивых многоуровневых систем, сочетающих состязательное обучение с использованием сгенерированных примеров вредоносных программ, тщательный отбор сложных семантических признаков, которые сложно подделать без нарушения функциональности кода, и гибридный подход, объединяющий различные методы обнаружения — от сигнатурного и поведенческого анализа до ансамблей ML-моделей.

Список источников

[1] *The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation.* URL: https://img1.wsimg.com/blobby/go/3d82daa4-97fe-4096-9c6b-376b92c619de/downloads/MaliciousUseofAI.pdf?ver=1553030594217 (accessed 29.10.25).

[2] *How Does WormGPT Work?* URL: https://openaimaster.com/how-does-wormgpt-work (accessed 31.10.25).

[3] *Adversarial Malware Binaries: Evading Deep Learning for Malware Detection in Executables.* URL: https://arxiv.org/pdf/1801.02950 (accessed 29.10.25).

[4] *Generating Adversarial Malware Examples for Black-Box Attacks Based on GAN.* URL: https://arxiv.org/pdf/1702.05983 (accessed 29.10.25).

[5] *Malicious Uses and Abuses of Artificial Intelligence.* URL: https://www.europol.europa.eu/cms/sites/default/files/documents/malicious_uses_and_abuses_of_artificial_intelligence_europol.pdf (accessed 29.10.25).

[6] *AI-Powered Malware Analysis: A Comparative Study of Traditional vs. AI-Based Approaches.* URL: https://www.researchgate.net/publication/383395000_AI-Powered_Malware_Analysis_A_Comparative_Study_of_Traditional_vs_AI-Based_Approaches (accessed 29.10.25).

Artificial intelligence - based malware: analysis of capabilities and threats

Popova Sofya Stanislavovna popovass@student.bmstu.ru

Potapov Alexey Vyacheslavovich

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article provides a comprehensive analysis of modern cyber threats based on artificial intelligence technologies. It examines the mechanisms and key characteristics of such threats, including large language model-based phishing agents, malware using generative adversarial networks, and autonomous adaptive botnets. The article demonstrates the fundamental ineffectiveness of traditional defense systems based on signature analysis and static rules against new adaptive threats. It is concluded that it is necessary to develop proactive multi-level protection systems that combine adversarial machine learning methods, analysis of complex semantic features, and hybrid detection approaches. The results obtained can be applied to create comprehensive next-generation cybersecurity systems and form an adequate regulatory framework governing the development and application of artificial intelligence technologies.

Keywords: *artificial intelligence, cybersecurity, malware, generative networks, large language models*

Секция 9. Динамика, прочность и надежность подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования

УДК 621.86

Определение коэффициента полезного действия цилиндрического редуктора

Сорокина Ирина Игоревна irina.sorokina@bmstu.ru
SPIN-код: 6627-5189
Трифонов Дмитрий Станиславович trifonovds@student.bmstu.ru
Христостомов Юрий Михайлович khristostomovyum@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены параметры, влияющие на коэффициент полезного действия (КПД) цилиндрического многоступенчатого редуктора. Изучены упрощенные варианты расчета суммарных потерь мощности. Описаны условия эксплуатации, позволяющие повысить КПД. Представлена схема лабораторного стенда для определения КПД. Полученные результаты соответствуют нормативно техническим характеристикам, представленным в справочной литературе. Сделаны выводы о возможности применения указанного упрощенного расчета в производственных условиях.

Ключевые слова: *КПД, цилиндрический редуктор, потери мощности, упрощенный расчет*

Определение КПД редуктора играет важную роль в решении ряда практических задач. Именно КПД редуктора влияет на выбор электродвигателя и снижение энергетических потерь, что позволяет снизить капитальные и/или эксплуатационные затраты. Снижение КПД может свидетельствовать об износе элементов зацеплений, подшипников, ухудшении смазки или других дефектах. Своевременный контроль КПД помогает не только выявлять проблемы на ранних стадиях, но и своевременно проводить ремонты и техобслуживание (ТО). В свою очередь контроль КПД между регламентными ТО позволяет оценить эффективность замены масла, регулировку зазоров и общее состояние редуктора, что ведет к оптимизации режимов нагрузки и предотвращению преждевременного износа. Таким образом, определение КПД цилиндрического редуктора актуальная задача, так как способствует повышению энергоэффективности привода в целом, позволяет контролировать техническое состояние редуктора, планировать ремонты и ТО, а также ведет к снижению затрат и увеличению срока службы оборудования.

Цель проводимого исследования — определение КПД цилиндрического редуктора в условиях учебной лаборатории. Для чего были реализованы следующие задачи: изучена методика расчета КПД и потерь мощности, получено КПД цилиндрического редуктора, проведено сравнение полученных результатов с регламентами значениями.

В рамках проводимого исследования для определения КПД цилиндрического редуктора использовались экспериментальный и расчетный методы.

Метод расчета основан на упрощенных формулах, учитывающих потери на трение и смазку. Расчетное выражение для определения КПД [1] (где индекс 1 относится к ведущему, 2 — к ведомому валам):

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_2\omega_2}{T_1\omega_1} = \frac{T_2 n_2}{T_1 n_1} = \frac{T_2}{T_1 u},$$

где P, T, ω, n — мощность (Вт), крутящий момент (Нм), угловая скорость ($с^{-1}$) и частота вращения (об/мин) соответственно; u — передаточное отношение редуктора (u = 9,81 для редуктора RCZ01-HS).

Суммарные потери мощности (Вт), определяющие общий КПД редуктора, рассчитываются следующим образом [1, 2]:

$$P_\psi = P_1 - P_2 = P_1(1-\eta) = \psi P_1,$$

где $\psi = (1-\eta) = \psi_з + \psi_п + \psi_{пм} + \psi_в$ — коэффициент относительных потерь в редукторе; $\psi_з \approx 2,3 f\left(1/z_1 \pm 1/z_2\right)$ — коэффициент относительных потерь в зацеплении; f — коэффициент трения; z_1, z_2 — число зубьев шестерни и колеса соответственно, при этом знак «+» — для внешнего, а «–» — для внутреннего зацеплений; $\psi_п$ — коэффициент относительных потерь в подшипниках (в подшипниках качения <0,010 [2]); $\psi_{пм}$ — коэффициент относительных потерь от перемешивания масла (для пластичной смазки — полусухое и сухое трение $\psi_{пм}$ = 0 [2]); $\psi_в$ — коэффициент относительных потерь на привод вентилятора (при отсутствии искусственного охлаждения $\psi_в$ = 0).

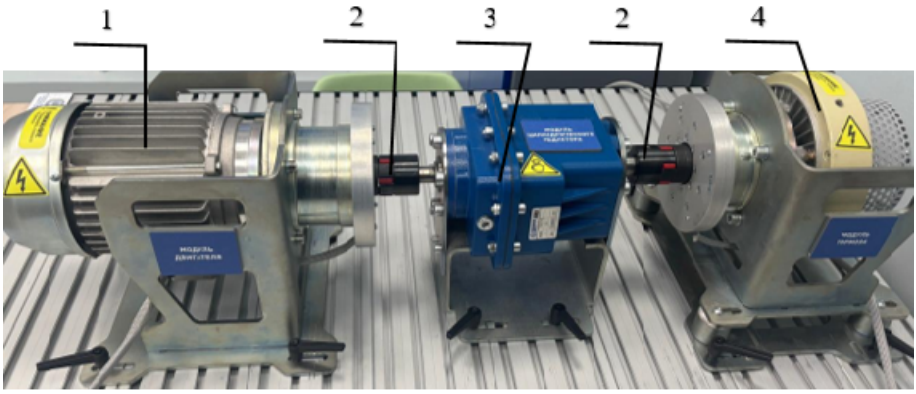
Анализ приведенных зависимостей показывает, что, во-первых, потери мощности, а соответственно и снижение КПД, увеличиваются с уменьшением чисел зубьев колес, особенно z_1. Во-вторых, при полужидкостном трении силы трения увеличиваются со снижением вязкости масла и скорости в зацеплении, что также ведет к снижению КПД, а при высоких скоростях формируется масляный клин, свойственный гидродинамическому режиму смазки. В-третьих, потери на перемешивание (взбивание) масла возрастают с увеличением окружной скорости, вязкости масла, ширины зубчатых колес и глубины их погружения в масляную ванну, что также негативно сказывается на КПД редуктора [2–4].

Экспериментальный метод предполагает проведение измерений на лабораторном стенде (см. рисунок) с электродвигателем, редуктором и нагрузочным устройством — порошковый тормоз.

Эксперимент заключался в измерении крутящего момента на входном и выходном валах. Использование датчиков крутящего момента с регулировкой электродвигателя дает возможность построения кривых, отображающих зависимость КПД от приложенной нагрузки, скорости вращения и других характеристик приводного механизма, что удовлетворяет поставленной цели

и способствует пониманию динамики и энергетической эффективности механической передачи.

Изучаемый редуктор RCZ01-HS — двухступенчатый соосный цилиндрический с двумя косозубыми зацеплениями, при этом КПД многоступенчатого редуктора зависит как от КПД отдельных ступеней, так и от подшипниковых узлов. Кроме того, на КПД значительное влияние оказывают рабочие условия. Так максимальный КПД достигается при стабильной нагрузке 75–90 % от номинальной мощности, в этом диапазоне нагрузки оптимально распределены в зубчатых зацеплениях, и при оптимальной смазке, а частые пуски и повышенные вибрации приводят к снижению КПД на 3–5 %, а работа цилиндрического редуктора на режимах, не превышающих 25 % от номинальных, ведет к снижению КПД на 6–8 % [3].



Автоматизированный лабораторный комплекс «Рабочие процессы механических передач» при определении КПД цилиндрического редуктора:

1 — модуль привода (двигатель); *2* — муфта упругая, с резиновой звездочкой; *3* — редуктор RCZ01-HS; *4* — модуль нагружения (тормоз)

В ходе проведенного лабораторного исследования, после предварительного прогревания установки, получены значения КПД изучаемого редуктора на уровне 0,96–0,98, что коррелирует с известными теоретическими данными [4].

Приведенные соотношения, подтвержденные экспериментально, позволяют определить КПД редуктора в «полевых» условиях. Для чего необходимо измерить электрическую мощность, потребляемую электродвигателем, определяя ток и напряжение с помощью ваттметра, например. Механические параметры на входном и выходном валах редуктора измеряются динамометрами или датчиками крутящего момента в сочетании с тахометрами. Одновременный контроль температуры не только позволит повысить точность оценки КПД, но и обнаружить перегрев, оказывающий негативное влияние на эффективность привода в целом.

Учитывая все вышеизложенное, задача определения фактического КПД цилиндрического редуктора в производственных условиях решается упро-

щенным расчетом и общедоступными методами, что важно для контроля технического состояния и оптимизации работы привода.

Список источников

[1] Мальтеев М.А., Силаев Б.М., Журавлев В.И. *Исследование характеристик механических передач в замкнутом контуре.* Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007, 80 с.

[2] Кушнаренко В., Чирков Ю., Ефанов А. *Механика.* Оренбург, Оренбургский государственный университет, 2014, 275 с.

[3] *Таблица КПД редукторов: цилиндрические, червячные, планетарные при нагрузках. Inner engineering.* URL: https://inner.su/articles/tablitsa-kpd-reduktorov-tsilindricheskie-chervyachnye-planetarnye-pri-nagruzkakh/ (дата обращения 30.10.2025).

[4] Дунаев П.Ф., Леликов О.П. *Конструирование узлов и деталей машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 568 с.

Determination of the efficiency of a cylindrical gearbox

Sorokina Irina Igorevna **irina.sorokina@bmstu.ru**
SPIN-code 6627-5189
Trifonov Dmitry Stanislavovich **trifonovds@student.bmstu.ru**
Khristostomov Yuri Mikhailovich **khristostomovyum@student.bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The parameters affecting the efficiency of a cylindrical multistage gearbox are examined. Simplified calculations of total power losses are studied. Operating conditions that can improve efficiency are described. A diagram of a laboratory setup for determining efficiency is presented. The obtained results correspond to the standard technical specifications presented in reference literature. Conclusions are drawn regarding the feasibility of applying this simplified calculation in a production environment.

Keywords: *efficiency, cylindrical gearbox, power losses, simplified calculation*

УДК 621.86

Модернизация вибрационного устройства очистки конвейерной ленты

Сорокина Ирина Игоревна irina.sorokina@bmstu.ru
SPIN-код: 6627-5189
Корешников Александр Иванович koreshnikovai@student.bmstu.ru
Никульшин Матвей Сергеевич nikulshinms@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена возможность модернизация устройства очистки конвейерной ленты от влажного сыпучего груза за счет крепежа каждого из стержневых барабанов, смонтированных на звездочках и обеспечивающих заданные параметры колебаний, к раме. Представлены критерии оценки конструкции крепления, согласно которым предложена конструкция, обеспечивающая простоту регулировки, обслуживания и расчета. Приведена расчетная схема для определения параметров предлагаемой конструкции. Сделаны выводы о возможности промышленного применения подобной конструкции с целью улучшения работоспособности и качества очистки.

Ключевые слова: *ленточный конвейер, вибрационное очистное устройство, винтовое натяжное устройство, проектировочный расчет*

Качество очистки конвейерной ленты от налипшего груза влияет на работоспособность конвейера, его эксплуатационные характеристики и стоимость обслуживания. В рамках проводимого исследования рассматривается возможность модернизации виброочистного устройства, состоящего из двухчастной стержневой системы, расположенной за приводным барабаном. Стержни каждой части системы вплотную прижаты к конвейерной ленте. Изменение количества стержней и их взаимного расположения позволяют влиять на параметры очистки — амплитуда и частота колебаний. Относительное движение стержневых систем синхронизировано посредством цепных передач. Для подтверждения работоспособности предложенной системы была разработана методика расчета на основе тяговой способности [1], подтвержденная расчетами на базе данных реально существующих машин. В дальнейшем был предложен ряд конструктивных изменений указанной системы для возможности создания продольных колебания ленты с целью улучшения качества очистки за счет «подбивания» остатков налипшего груза в наиболее загрязненной центральной части ленты [2]. Однако работа указанного устройства возможна только в том случае, если стержни системы плотно контактируют с конвейерной лентой. При этом крепление очистного устройства к раме конвейера предлагалось выполнять жестким, без возможности регулировки положения частей системы по отношению к конвейерной ленте. Таким образом, разработка варианта конструкции крепления указанной си-

стемы к раме конвейера с возможностью регулировки контакта стержней системы с лентой является актуальной.

Целью исследования был поиск промышленно применимого и простого по конструкции и расчету способа крепления частей очистной системы к раме конвейера. Для достижения поставленной цели в рамках исследования решены следующие задачи: проанализированы критерии, предъявляемые к креплениям очистных устройств, выбрана конструкция и предложена методика расчета винтового нажимного устройства, отвечающего всем заявленным требованиям.

Схема крепления вибрационного очистного устройства должна учитывать надежность, точность, удобство обслуживания, виброизоляцию и безопасность. Всем этим критериям соответствует применение винтового нажимного устройства для контроля степени прижатия каждой из двух частей системы к ленте. Такое устройство технологично, удобно в обслуживании, достаточно просто рассчитывается для любой геометрии и обладает возможностью регулирования степени прижатия очистителя к ленте, что обеспечивает надежность работы и предотвращает аварийные ситуации.

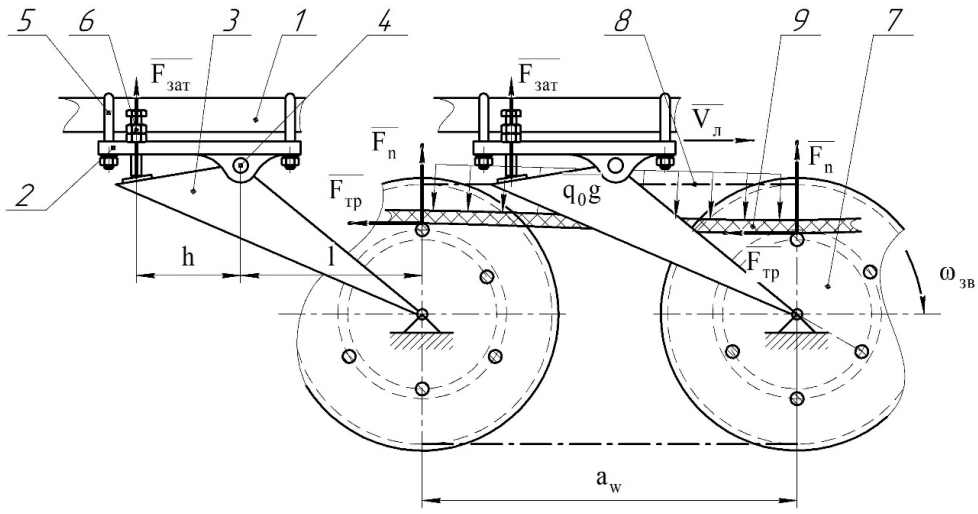
Учитывая, что предлагаемая конструкция содержит две части, стержни в которых расположены на разной высоте, но соединенные гибкой связью — цепной передачей, предлагается выполнять независимую регулировку. То есть, в рамках модернизации предлагается выполнить отдельные натяжные устройства для каждой из частей системы, а также заменить подшипниковые опоры с защитными шайбами и заложенной в них смазкой на классические шарикоподшипники, устанавливаемые в корпусе опор. Параметры нажимного винта предлагается рассчитывать в зависимости от геометрических характеристик системы, пользуясь классическими уравнениями равновесия [3], заложив 15 % запас на неравномерность прижатия ленты к стержням системы в запас соединения. Расчетная схема приведена на рисунке.

Учитывая, что натяжное устройство должно обеспечить контакт ленты с верхним стержнем системы, силой затяжки болта необходимо уравновесить нормальную реакцию, возникающую в месте контакта стержней каждой части системы с нерабочей поверхностью сбегающей ветви конвейерной ленты:

$$F_{зат} h \geq F_n l \quad \Rightarrow \quad F_{зат} = k \frac{q_0 \left(a_w + L\right) g l}{h},$$

где q_0 — распределенная масса ленты, кг/м; a_w — межосевое расстояние цепной передачи, м; L — расстояние от стержневой системы до барабана или первого холостого ролика, м: l, h — плечи рычага системы, м; $k = 1{,}15$ — коэффициент запаса, учитывающий неравномерность прижатия ленты.

Определив необходимую по конструкции силу затяжки, можно подобрать или проверить на прочность резьбу нажимного болта, пользуясь классической зависимостью [4]: $\sigma_{экв} = \dfrac{1{,}3 \cdot 4 F_{зат}}{\pi \left(d_1\right)^2} \leq [\sigma]$.



Расчетная схема крепления виброочистного устройства:
1 — металлоконструкция конвейера; *2* — крепежная планка; *3* — рычаг; *4* — ось; *5* — крепежная скоба; *6* — нажимной болт; *7* — стержневая система, смонтированная на звездочках; *8* — цепь; *9* — лента

В результате проведенного исследования выбрано винтовое натяжное устройство, отвечающее всем требованиям, предъявляемым к креплению виброочистной системы на конвейере. Заявленный технический эффект достигается за счет того, что стержни системы вплотную прижаты к конвейерной ленте, что позволяет создать хороший контакт с нерабочей поверхностью сбегающей ветви конвейерной ленты. Предложенное натяжное устройство промышленно применимо на стационарных конвейерах, позволяет повысить эффективность очистки конвейерной ленты.

Список источников

[1] Сорокина И.И., Желтиков А.А. Вибрационное устройство для очистки конвейерной ленты. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2024, вып. 8, с. 549–554.

[2] Сорокина И.И. *Устройство для очистки конвейерной ленты.* Патент № 232049 U1 РФ, 2025, бюл. № 6.

[3] Никитин Н.Н. *Курс теоретической механики*. Санкт-Петербург, Лань, 2023, 720 с.

[4] Иванов М.Н., Финогенов В.А. *Детали машин.* Москва, Высшая школа, 2010, 408 с.

Modernization of the vibration device for cleaning conveyor belt

Sorokina Irina Igorevna irina.sorokina@bmstu.ru
SPIN-code: 6627-5189
Koreshnikov Alexander Ivanovich koreshnikovai@student.bmstu.ru
Nikulshin Matvey Sergeevich nikulshinms@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The possibility of upgrading the device for cleaning the conveyor belt from wet bulk cargo by fastening each of the rod drums mounted on sprockets and providing given vibration parameters to the frame is considered. The criteria for evaluating the fastening design are presented, according to which a design is proposed that provides ease of adjustment, maintenance and calculation. Calculation scheme for determination of parameters of the proposed structure is given. Conclusions were drawn about the possibility of industrial use of such a design in order to improve the efficiency and quality of cleaning.

Keywords: *belt conveyor, vibration cleaning device, screw tensioner, design calculation*

УДК 621.86

Повышение надежности конвейера на основе резервирования приводной станции

Сорокина Ирина Игоревна irina.sorokina@bmstu.ru
SPIN-код: 6627-5189

Ловчев Олег Вячеславович oleg.lowchev2016@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема обеспечения бесперебойной работы шахтного конвейера. Представлен анализ приводной станции с использованием методов теории надежности. Показано, что последовательное применение резервирования третьим, а в случае повышенных требований — четвертым приводом, позволяет существенно повысить коэффициент готовности системы. Сделаны выводы, что предлагаемый подход позволяет минимизировать риски аварийных остановок и может применяться для обоснования проектных решений при модернизации шахтного конвейерного транспорта.

Ключевые слова: *шахтный конвейер, надежность, резервирование привода, коэффициент готовности, тяговый расчет*

Актуальность резервирования привода шахтного конвейера для повышения надежности его работы обусловлена высокой значимостью конвейерного транспорта в предлагаемых условиях работы, необходимостью предотвращения простоев и аварийных ситуаций. Резервирование заключается в применении дополнительных элементов или, другими словами, логическом параллельном соединении однотипных элементов, узлов, блоков и целых систем для повышения надежности системы в целом. В условиях горнодобывающей промышленности, как правило, используют раздельное постоянное резервирование, когда при возникновении отказа не происходит перестройка структуры системы, так как отдельные резервные элементы или узлы системы включены непрерывно [1]. Современные требования к автоматизации управления конвейерными линиями предполагают наличие систем, способных эффективно взаимодействовать с резервными приводами. Резервирование привода помогает не только минимизировать экономические потери от вынужденных простоев, но и уменьшить износ основных узлов привода [1, 2].

Цель работы — провести количественную оценку приводной станции конвейера 1Л120 на основе теории надежности при последовательном введении резервирования его приводов. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: выполнен тяговый расчет конвейера с последующим подбором электродвигателей. Определено количество резервных приводов с обоснованием их введения на основе теории надежности.

В рамках проведенного исследования анализировалась необходимость резервирования привода шахтного конвейера 1Л120 длиной 1000 м, переда-

точное число редуктора 25, состав привода — электродвигатель, гидромуфта для плавного пуска конвейера, во избежание обрыва ленты, лента, упругая муфта с торообразной оболочкой, редуктор, зубчатая муфта и барабан. Согласно тяговому расчету [3] необходимая мощность привода — 398 кВт. Таким образом, в качестве базовой системы для определения количества приводов с целью обеспечения надежности работы шахтного конвейера была выбрана система с двумя приводами от двигателя ВАО2-315М4 мощностью 250 кВт каждый.

На первом этапе была рассчитана надежность базовой системы с двумя рабочими приводами. Расчеты показали, что для обеспечения требуемой надежности в условиях неравномерного грузопотока и высоких нагрузок базовой конфигурации с двумя приводами недостаточно.

На втором этапе проанализирована система с резервированием третьим приводом по схеме с нагруженным резервом, схема представлена на рисунке [4]. Расчетный коэффициент готовности системы увеличился более чем на 25 % по сравнению с базовым вариантом, что подтверждает эффективность данного решения для большинства эксплуатационных сценариев.

Для объектов с особыми требованиями к непрерывности технологического процесса рассмотрена конфигурация с резервированием четвертым приводом. Расчетный коэффициент готовности системы в этом случае будет приблизительно на 40 % больше изначального значения.

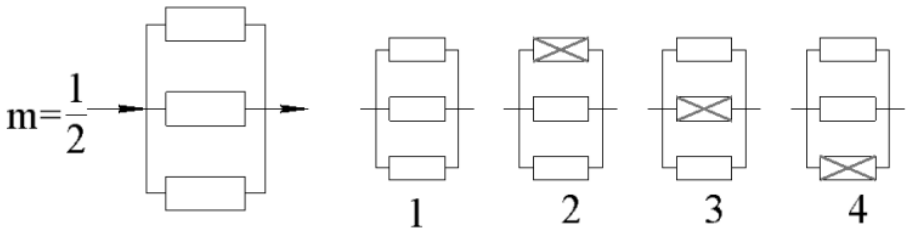


Схема постоянного общего резервирования с кратностью 1/2
и варианты работоспособного состояния системы [4]

Практическая реализация подобных систем подтверждает результаты расчетов. Примеры успешного внедрения резервированных приводов на руднике «Центральный» АО «Апатит» в России, где система резервирования приводов работает более десяти лет, Донском ГОК в Казахстане и ряде украинских шахт демонстрируют их высокую эксплуатационную эффективность. Техническая реализация включает использование дублированных схем питания электродвигателей с резервированием тиристорных преобразователей возбуждения и управления, что обеспечивает устойчивую работу конвейерного привода при отказах отдельных элементов. Такие системы прошли наладку и доказали свою эффективность в реальных условиях горной добы-

чи, значительно повышая надежность и снижая риски непредвиденных остановок оборудования [5]. Приводные резервированные системы с дублированием ключевых компонентов успешно внедряются и эффективно функционируют на различных шахтах Восточной Европы и Центральной Азии, что подтверждает актуальность и практическую пользу резервирования приводов для повышения надежности работы шахтных конвейеров [5].

Таким образом, исследование, проведенное на основе теории надежности, доказывает, что стратегия последовательного резервирования приводных станций является научно-обоснованным и экономически целесообразным подходом для значительного повышения надежности и бесперебойности работы шахтных конвейеров. Приведенная методика позволяет оптимизировать проектные решения при создании и модернизации отечественного горно-транспортного оборудования.

Список источников

[1] Иванов А.А., ред. *Автоматизация процессов подземных горных работ*. Донецк, Вища шк. Головное иэд-во, 1987, 328 с.

[2] Николаев А.К., Иванов С.Л., Габов В.В. *Надежность горных машин и оборудования.* Санкт-Петербург, Лань, 2022, 100 с.

[3] Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. *Машины непрерывного транспорта.* Москва, Машиностроение, 1987, 432 с.

[4] итчук П.В. *Надежность подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин*. Калуга, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 81 с.

[5] Бабенко А.Н. *Теоретическое обоснование и методология повышения уровня охраны труда в угольных шахтах на основе риск-ориентированного подхода и многофункциональных систем безопасности.* Дис. … д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2016, 259 с.

Increasing the reliability of a conveyor based on the redundancy of the drive station

Sorokina Irina Igorevna irina.sorokina@bmstu.ru
SPIN-code: 6627-5189

Lovchev Oleg Vyacheslavovich oleg.lowchev2016@yandex.ru

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

The problem of ensuring the uninterrupted operation of a mine conveyor is considered. The analysis of the drive station is presented using the methods of the reliability theory. It is shown that the sequential application of the third, and in case of increased requirements, the fourth drive, allows to significantly increase the availability of the system. It is concluded that the proposed approach allows to minimize the risks of emergency stops and can be used to substantiate design decisions in the modernization of mine conveyor transport.

Keywords: *mine conveyor, reliability, drive redundancy, availability factor, traction calculation*

УДК 621.86

Некоторые итоги применения перспективной методики экспресс-оценки работоспособности цилиндрических редукторов

Леонтьев Михаил Юрьевич[1, 2] newell-kaluga@mail.ru
Смоловик Андрей Евгеньевич[2] asmolovik@bmstu.ru
Михайлов Николай Юрьевич[1] mihailovnicky@mail.ru

[1] *ПАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия*
[2] *КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия*

Подведены предварительные итоги практического применения описанной ранее методики экспресс-оценки работоспособности цилиндрических зубчатых передач. Показано, что при удвоении анализируемой выборки редукторов и расширении диапазона передаваемых ими мощностей и нагрузок основные результаты и выводы, полученные ранее с использованием данной методики, подтверждаются. Представленные результаты свидетельствуют, что для полноценного внедрения рассматриваемой методики два из трех критериев, на которых она основывается, нуждаются в дальнейшем уточнении с привлечением более представительной статистики.

Ключевые слова: *цилиндрический редуктор, линейная нагрузка, контактная прочность, суммарная деформация, ограничительные критерии*

При создании и эксплуатации редукторов специалисты до сих пор ориентируются на целый ряд ограничений по воспринимаемым зубчатыми колесами нагрузкам и деформациям, сформулированным более полувека назад (например, в работе [1]). Однако с тех пор скорости и нагрузки значительно выросли [2], а для проектирования и оптимизации редукторов сегодня широко применяются численные методы [3]. Это свидетельствует о том, что вопрос об актуальности подходов, считающихся «традиционными», давно назрел.

Целью работы явилась проверка на расширенной выборке современных редукторов актуальности известных из литературы ограничений по линейным нагрузкам, контактным напряжениям и деформациям цилиндрических зубчатых колес. Для этого в представленной работе количество редукторов в анализируемой выборке удвоено по сравнению с предшествующими исследованиями.

Использовались те же расчетные формулы и соотношения, что и ранее [4–6]:

$$k_p = \frac{q}{d}\frac{i+1}{i} \leq 2{,}16 \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$\Delta_\Sigma = \frac{4\,q}{\pi\,G\,(1 - m^4)} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^2 + 0{,}4244 \cdot \frac{q}{E(1-m^4)} \cdot \left[\frac{2b}{d}\right]^4 \cdot A \leq 20 \text{ мкм} \quad (2)$$

$$q = \frac{P}{2b} \leq 730 \text{ Н/м}, \tag{3}$$

где k_p — коэффициент контактной прочности; Δ_Σ — суммарная крутильно-изгибная деформация ведущей шестерни (колеса, имеющего меньший диаметр, и обладающего заведомо меньшей жесткостью), при этом q — линейная нагрузка от передаваемого окружного усилия P; $2b$ — полная ширина активной части шевронного зубчатого зацепления; d — делительный диаметр шестерни; i — передаточное отношение зубчатой пары; m — отношение диаметра внутренней расточки к делительному диаметру шестерни; E и G — модули упругости и сдвига материала;

$$A = \left[1 + 4\frac{c}{2b} + 6\left(\frac{c}{2b}\right)^2\left[3\left(\frac{b}{l}\right)^2\right] - 2\left(\frac{b}{l}\right)^4\right] + 1{,}5\frac{a}{b}\left[1 + 2\frac{c}{2b}\right]$$ —

параметр, учитывающий геометрические соотношения элементов l, b и c расчетной схемы (рис. 1).

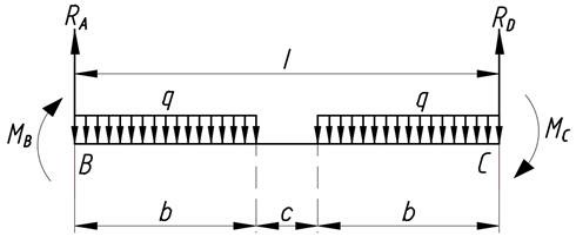
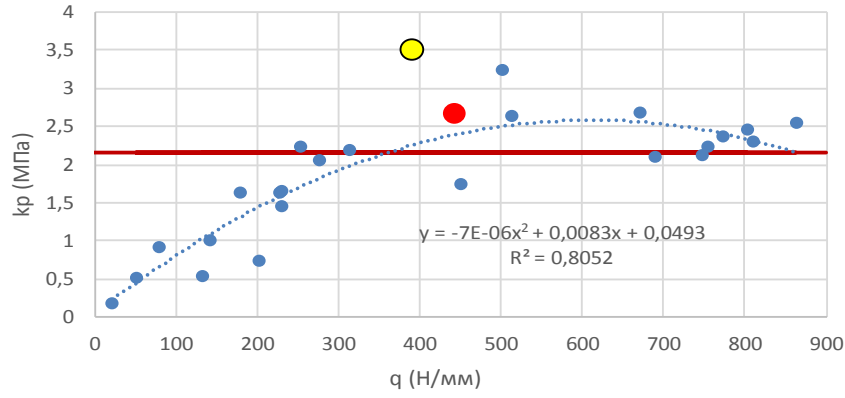


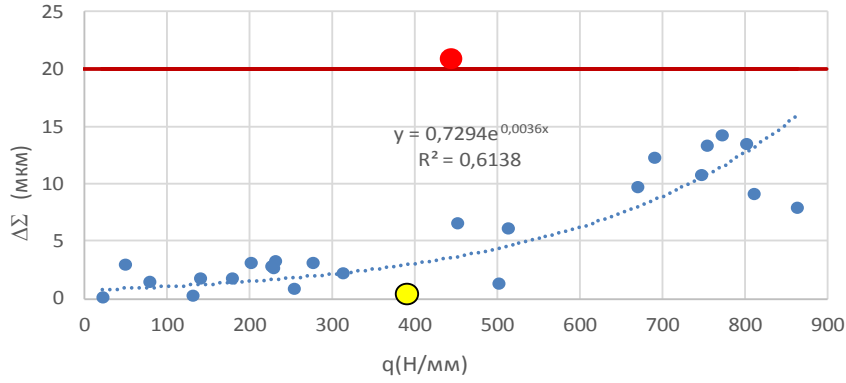
Рис. 1. Расчетная схема для оценки прогиба шестерни [1]

В работах [4–6] была рассмотрена выборка из 12 редукторов ведущих отечественных и зарубежных фирм, производящих турбинные редукторы и редукторы общепромышленных серий. В настоящей работе эта выборка увеличена вдвое, а ее нагрузочно-мощностной диапазон расширен. Как и ранее рассмотрены редукторы компаний «Силовые Машины», «Кировский Завод», «Калужский турбинный завод», FLENDER-GRAFFENSTADEN, RENK-MAAG, VAKOMA и др. Исследованные диапазоны мощностей и нагрузок составили $N = 75\ 000$–$85\ 000$ кВт и $q \approx 20$–800 кН/м, соответственно. Полученные результаты приведены на рис. 2.

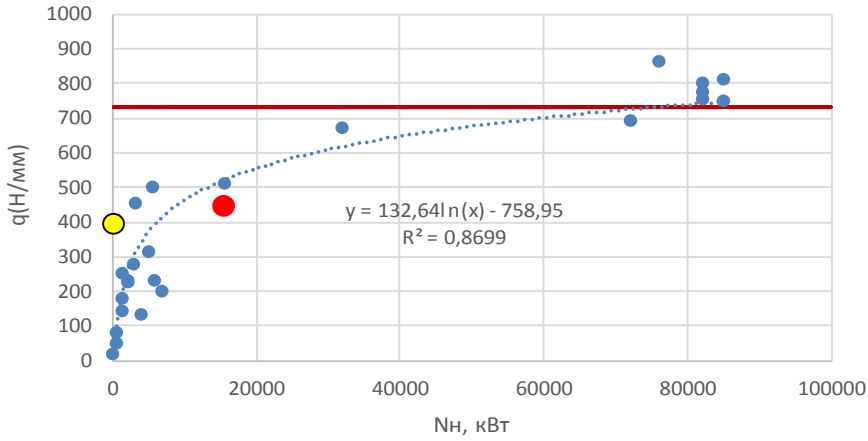
Из рис. 2 следует, что ограничения (1) и (3) не в полной мере соответствуют актуальной статистике и требует пересмотра в сторону повышения. При этом критерий (2) не только подтверждается, но и, как отмечено в [5], уже позволил выявить ошибку данных в рекламных материалах одной известной фирмы. Так, еще в работе [4], на момент публикации которой об этой ошибке не было известно, были высказаны сомнения в работоспособности редуктора, имеющего деформацию шестерни, столь отличную от других редукторов выборки (рис. 2, *б*).



а



б



в

Рис. 2. Расширенная статистика нагруженности редукторов:

а — Коэффициент контактной прочности (1); *б* — суммарная деформация ведущих шестерен (2); *в* — линейная нагрузка на зацепление (3); ● — значения для образцов 1-24; ○ — значения для примера из ГОСТ 21354-87; ● — значения для образца с ошибкой в исходных данных [4, 5]; — максимально допустимые значения в соответствии с работой [1]

Из рис. 2 также следует, что вывод работы [6] о том, что критерии (1)–(3) не дублируют, а дополняют друг друга, подтвердился и на расширенной выборке. В связи с этим показателен редуктор, рассмотренный в качестве примера в ГОСТ 21354-87. Из рисунка видно, что, передавая малую мощность и воспринимая умеренную линейную нагрузку (рис. 2, *в*) шестерня данного редуктора практически не деформируется (рис. 2, *б*), однако при этом имеет рекордно высокое значение коэффициента, характеризующего контактные напряжения (рис. 2, *в*).

Отметим, что последнее обстоятельство позволило в ходе дальнейшего анализа выявить существенные несоответствия между одной из рекомендаций работы [1] и указанным стандартом [7]. Подробный разбор этого «кейса» будет выполнен позже.

На основании изложенного можно заключить, что:

– основные выводы, сделанные ранее по результатам апробации методики экспресс-оценки работоспособности цилиндрических редукторов, подтверждаются и при удвоении выборки анализируемых редукторов, и при расширении диапазона передаваемых ими мощностей и нагрузок;

– рассматриваемая методика позволяет выявлять грубые промахи при проектировании (либо ошибки представления данных в документации), может использоваться при создании новых и оценке применимости имеющихся в наличии редукторов на заданных режимах, в учебных целях, для решения других задач;

– для полноценного практического применения данной методики два из трех использующихся в ней «традиционных» ограничения по расчетной нагруженности редукторов нуждаются в уточнении с привлечением более представительной актуальной статистики.

Список источников

[1] Моисеев А.А., Розенберг А.Н. *Расчет прочности судовых паровых и газовых турбозубчатых агрегатов.* Ленинград, Судостроение, 1970, 432 с.

[2] Леонтьев Ю.А., Ямпольский И.Д., Хомяков В.П., Леонтьев М.Ю. *Опыт создания на ОАО «КТЗ» судовых редукторов большой мощности.* Калуга, Манускрипт, 2002, с. 134–144.

[3] Леонтьев М.Ю., Насонов Д.А., Раевский В.А. *Динамика тяжелонагруженных планетарных редукторов. Рекомендации к конечноэлементному моделированию.* Саарбрюккен, LAMBERT Academic Publishing, 2020, 138 с.

[4] Леонтьев М.Ю., Смоловик А.Е., Михайлов Н.Ю. Актуализация методики экспресс-оценки работоспособности цилиндрических зубчатых редукторов. *Интерстроймех-2024: сб. ст.* Самара, СамГТУ, 2024, с. 66–70.

[5] Леонтьев М.Ю., Смоловик А.Е., Михайлов Н.Ю. Опыт применения некоторых традиционных критериев работоспособности к современным зубчатым редукторам. *Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Всерос. НТК: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, т. 1, с. 341–345.

[6] Леонтьев М.Ю., Смоловик А.Е., Михайлов Н.Ю. Еще один традиционный критерий нагруженности редукторов и его актуализация. *Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. VI Всерос. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2025, с. 354–357.

[7] Leontev M.Yu., Smolovik A.E., Nakhatakyan F.G., Guskova A.S. Analyzing Methodology for Rapid Assessment of Cylindrical Gearbox Operability. *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE),* 2025, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10971098

Some results of applying a promising methodology for rapid assessment of cylindrical gearboxes operability

Leontev Mikhail Yurievich[1, 2] newell-kaluga@mail.ru
Smolovik Andrey Evgenjevich[2] asmolovik@bmstu.ru
Mikhailov Nikolay Yurevich[1] mihailovnicky@mail.ru

[1] *PJSC "Kaluga Turbine Works", Kaluga, Russia*
[2] *Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia*

The preliminary results of the practical application of the previously described methodology for rapid assessment of cylindrical gearboxes operability have been summarized. It has been shown that when the sample of gearboxes being analyzed is doubled and the range of power and load transmitted by them is expanded, the main results and conclusions obtained earlier using this methodology are confirmed. The presented results indicate that in order to fully implement this methodology, two of the three criteria on which it is based need further refinement using more representative statistics.

Keywords: *cylindrical gearbox, linear load, contact strength, total deformation, limiting criteria*

Секция 10. Математическое моделирование и физико-математические проблемы проектирования сложных технических систем

УДК 51-7

Математическое моделирование давления крови в сосудах

Зенкина Ирина Александровна zenkinaia@bmstu.ru
Зенкина Полина Никитична zhuravlevapn@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена задача об изменении давления крови в сосудах. Сердечно-сосудистая система моделирована замкнутой системой труб разного диаметра, по которым под давлением, нагнетаемым насосом, движется жидкость. Рассмотрены диастолическая и систолическая фазы. На основе закона Пуазейля составлено дифференциальное уравнение, отражающее изменение давление жидкости от времени. Уравнение проинтегрировано с учетом начальных условий. Получена зависимость изменения давления крови в аорте с течением времени.

Ключевые слова: *дифференциальное уравнение, закон Пуазейля, зависимость давления от времени*

Знание закона изменения давления крови в сосудах имеет важное практическое значение для современной медицины. Точное моделирование течения крови позволяет разрабатывать и совершенствовать медицинские устройства, помещаемые в сосуды, в частности, прогнозировать поведение устройств в сосуде, оптимизировать их форму и размеры, оценивать влияние на кровоток.

Сердечно-сосудистую систему с точки зрения физики можно моделировать замкнутой системой труб разного диаметра, по которым движется под давлением жидкость, нагнетаемая насосом [1–3]. В качестве насоса выступает сердце, которое является полым мышечным органом, состоящим из двух предсердий и двух желудочков. При сокращении кровь под давлением выталкивается из левого и правого желудочков в сосуды. Артерии, которые могут растягиваться и сокращаться под воздействием эластичных волокон, находящихся в них, можно моделировать как полые трубы переменного диаметра. Когда кровь, выталкиваемая сердцем, проходит по артериям и давит на их стенки, сосуды растягиваются, а затем под действием эластичных волокон сужаются. Так в сосудах возникает давление, позволяющие крови двигаться дальше по сосудам. Максимальное (систолическое) давление крови достигается во время сокращения сердца, а минимальное (диастолическое) наблюдается во время покоя.

Составим упрощенную математическую модель сердечно-сосудистой системы. Аорту при этом будем рассматривать как упругий сосуд, который связан с полой трубкой, создающей потоку жидкости сопротивление [2].

Рассмотрим промежуток времени, в течение которого насос находится в покое, и в сосуде давление, соответственно, минимально.

Запишем уравнение, выражающее зависимость давления p в сосуде от его объема V:

$$\left|\frac{dp}{dV}\right| = k\,, \tag{1}$$

где k — постоянная величина.

Принимая давление на входе равным нулю, запишем закон Пуазейля, характеризующий изменение объема жидкости в зависимости от времени:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{p}{\omega},\ \omega = \frac{8l\mu}{\pi r^4}, \tag{2}$$

где ω — постоянное сопротивление течению жидкости; l — длина трубки; μ — вязкость жидкости; r — радиус трубки.

На основе уравнений (1) и (2) составим дифференциальное уравнение, выражающее изменение давления с течением времени:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{k}{\omega}dt\,. \tag{3}$$

Полученное уравнение (3) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными [4], и его решение имеет вид

$$p = C\cdot e^{-\frac{kt}{\omega}}. \tag{4}$$

Из полученного соотношения можно сделать вывод о том, что в течение покоя сердечной мышцы давление в аорте убывает с течением времени по экспоненциальному закону.

Теперь рассмотрим промежуток времени, в течение которого кровь поступает под давлением в аорту в результате сокращения сердечной мышцы. Изменение объема жидкости зависит от количества поступающей и от количества вытекающей из сосуда жидкости.

На основе закона Пуазейля можно записать скорость изменения объема жидкости, вытекающей из сосуда. Учтем при этом количество жидкости $q(t)$, поступающей в сосуд в единицу времени, тогда изменение объема жидкости в сосуде в зависимости от времени, будет описываться уравнением:

$$\frac{dV}{dt} = q(t) - \frac{p}{\omega}\,. \tag{5}$$

С учетом соотношения (1) уравнение (5) может быть записано в следующем виде:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{k}{\omega}p = k\cdot q(t)\,. \tag{6}$$

Будем считать, что количество жидкости, поступающей в сосуд, изменяется по синусоидальному закону: $q(t) = Q\sin\beta t$. Тогда уравнение (7) примет вид

$$\frac{dp}{dt}+\frac{k}{\omega}p=k\cdot Q\sin\beta t\,. \tag{7}$$

Уравнение (7) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка со специальной правой частью. Решая его, получим следующую зависимость давления жидкости в сосуде от времени:

$$p=Ce^{-\frac{k}{\omega}t}+\frac{Qk\omega}{k^2+\beta^2\omega^2}\left(k\sin\beta t-\omega\beta\cos\beta t\right). \tag{8}$$

Пусть в начальный момент времени t_0 давление в сосуде было равно p_0. Тогда после нахождения постоянной C уравнение (8) принимает окончательный вид

$$p=\left(p_0+\frac{Qk\beta\omega^2}{k^2+\beta^2\omega^2}\right)e^{-\frac{k}{\omega}t}+\frac{Qk\omega}{k^2+\beta^2\omega^2}\left(k\sin\beta t-\omega\beta\cos\beta t\right). \tag{9}$$

Таким образом, получена зависимость изменения давления крови в аорте с течением времени.

Список источников

[1] Зенкина И.А. *Математическое моделирование газодинамических подшипников со спиральными канавками*. Дис. … канд. физ.-мат. наук. Калуга, 2004, 262 с.

[2] Емельянов А.В., Емельянов И.А., Зенкина И.А. Анализ физических процессов, протекающих в смазочных слоях газодинамических подшипников. *Инженерный вестник Дона*, 2017, № 4, с. 1–13.

[3] Зенкин В.Н., Зенкина И.А. Расчет формы сосуда с равномерно вытекающей жидкостью. Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. *Регион. НТК: сб. матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с. 427–430.

[4] Пономарев К.К. *Составление дифференциальных уравнений*. Минск, Высшая школа, 1972, 507 с.

Mathematical modeling of blood pressure in blood vessels

Zenkina Irina Aleksandrovna zenkinaia@bmstu.ru
Zenkina Polina Nikitichna zhuravlevapn@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The problem of changing blood pressure in blood vessels is considered. The cardiovascular system is modeled by a closed system of pipes of different diameters, through which liquid moves under pressure pumped by a pump. The diastolic and systolic phases are considered. Based on Poiseuille's law, a differential equation has been compiled that reflects the change in fluid pressure over time. The equation is integrated taking into account the initial conditions. The dependence of changes in blood pressure in the aorta over time was obtained.

Keywords: *differential equation, Poiseuille's law, pressure dependence on time*

УДК 517.958

Об одной модели нестационарной одномерной гидродинамической дисперсии в осесимметричном фильтрационном течении

Куликов Анатолий Николаевич kulikov.auat@bmstu.ru
Пашутин Максим Михайлович pashutinmaksym@yandex.ru
Никулин Матвей Андреевич nikulin.m4t@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен один из частных случаев явления гидродинамической дисперсии, то есть миграции растворимых веществ при движении жидкостей через пористые среды. Предлагаемая модель переноса учитывает только молекулярную диффузию и конвективный перенос. Получены общие решения для соответствующих дифференциальных уравнений. Приведен пример решения краевой задачи с однородными условиями в элементарных функциях, что может быть использовано при решении многих задач математической физики, в том числе и с неоднородными краевыми условиями.

Ключевые слова: *массоперенос, гидродинамическая дисперсия, конвективная диффузия, краевые задачи*

Многие явления переноса, в том числе и явление гидродинамической дисперсии, описываются дифференциальным уравнением [1, 2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = div\left[D \cdot gradC - C\vec{U}\right]. \quad (1)$$

Для рассматриваемого в работе явления $C(M,t)$ — относительная концентрация растворимого вещества — функция координат и времени, $\vec{U}$ — скорость фильтрационного течения, D — коэффициент гидродинамической дисперсии, зависящий от скорости потока и структуры пористой среды. Многообразие факторов и типов течений, влияющих на распределение концентрации вещества $C(M,t)$ приводят к различным частным случаям движения растворимых примесей в фильтрационных потоках, а значит и к различным уравнениям в частных производных, позволяющим получить интересующие распределения $C(M,t)$.

В предлагаемой работе рассматривается нестационарный конвективный перенос растворимого вещества в поле фильтрации линейного, логарифмического источника (стока) с учетом молекулярной диффузии.

В полярной системе координат это уравнение имеет вид [1, 3]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = U\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{D}{U}\frac{\partial C}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{D}{Ur}\frac{\partial C}{\partial \theta}\right) \mp \frac{\partial C}{\partial r}\right], \quad (2)$$

r, θ — полярные координаты; t — время; $C(r,\theta,t)$ — абсолютная величина скорости течения; $Q^* = \frac{Q}{2\pi Bn}$ — приведенный расход жидкости; Q — расход

жидкости; B — линейный размер источника (стока); n — пористость среды, верхний знак перед производной $\frac{\partial C}{\partial r}$ соответствует расходящемуся течению, нижний — сходящемуся.

Если ввести безразмерные координаты [3] $\rho = \frac{r}{a_1}$, a_1 — продольная дисперсионность, $\tau = \frac{Q^*}{a_1^2}t$, $b = \frac{D}{Q^*}$ и ограничиться одномерным, осесимметричным распределением концентрации, то уравнению (2) можно придать вид:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial \rho^2} + \frac{b}{\rho}\frac{\partial C}{\partial \rho} = \frac{\partial C}{\partial \tau}. \tag{3}$$

Разделяя переменные, получим

$$C(\rho, \tau) = R(\rho)T(\tau); \tag{4}$$

$$\frac{d^2R}{d\rho^2} + \frac{b \mp 1}{b\rho} + \frac{\lambda^2}{b}R = 0; \tag{5}$$

$$\frac{dT}{d\tau} + \lambda^2 T = 0, \tag{6}$$

λ — константа в методе разделения переменных выбрана с таким знаком, чтобы решения были убывающими во времени.

Общий интеграл уравнения (6)

$$T(\tau) = A_1 e^{-\lambda^2 \tau}, \tag{7}$$

а уравнение (5) является частным случаем уравнения

$$y'' - 2py - cxy = 0, \tag{8}$$

решение которого выражается через цилиндрические функции Бесселя, и имеет вид [4]:

$$(x) = x^{p+\frac{1}{2}} \cdot Z_{p+\frac{1}{2}}\left(i\sqrt{c}x\right). \tag{9}$$

Тогда

$$R(\rho) = \rho^{\pm\frac{1}{2b}} Z_{\pm\frac{1}{2b}}\left(\frac{\lambda\rho}{\sqrt{b}}\right), \tag{10}$$

и

$$C(\rho, \tau) = \rho^{\pm\frac{1}{2b}}\left[J_{\frac{1}{2b}}\left(\rho\frac{\lambda}{\sqrt{b}}\right) + BJ_{-\frac{1}{2b}}\left(\rho\frac{\lambda}{\sqrt{b}}\right)\right]e^{-\lambda^2\tau}. \tag{11}$$

Отметим, что если $\frac{1}{b}$ — есть целое нечетное число, то выражение (10) для определения $R(\rho)$ упрощается, т. к. функции Бесселя полуцелого индекса выражаются через элементарные функции.

Так, например, в случае $b = 1$ вместо

$$C(\rho,\tau)=\rho^{\pm\frac{1}{2}}\left[AJ_{\frac{1}{2}}(\lambda\rho)+BJ_{-\frac{1}{2}}(\lambda\rho)\right]e^{-\lambda^2\tau}, \quad (12)$$

после применения формул [5]

$$J_{\frac{1}{2}}(z)=\sqrt{\frac{2}{\pi z}}\sin z\,, J_{-\frac{1}{2}}(z)=\sqrt{\frac{2}{\pi z}}\cos z, \quad (13)$$

получим

$$C(\rho,\tau)=\rho^{\pm\frac{1}{2}}\left(\frac{2}{\pi\lambda\rho}\right)^{1/2}[Asin(\lambda\rho)+Bcos(\lambda\rho)]e^{-\lambda^2\tau}, \quad (14)$$

или

$$C(\rho,\tau)=\left(\frac{2}{\pi\lambda}\right)^{1/2}[Asin(\lambda\rho)+Bcos(\lambda\rho)]e^{-\lambda^2\tau}, \quad (15)$$

и

$$C(\rho,\tau)=\left(\frac{2}{\pi\lambda}\right)^{1/2}\frac{1}{\rho}[Asin(\lambda\rho)+Bcos(\lambda\rho)]e^{-\lambda^2\tau} \quad (12)$$

— поля концентрации растворимого вещества в случаях расходящегося и сходящегося фильтрационных течений соответственно.

Полученные общие решения уравнения (3) позволяют поставить ряд краевых задач, методы решения которых хорошо известны в математической физике.

В качестве примера рассмотрим первую краевую задачу с однородными граничными условиями и заданным начальным распределением, то есть потребуем чтобы

$$C(\rho_1,\tau)=C(\rho_2,\tau)=0 \quad (12)$$

и

$$C(\rho,0)=\varphi(\rho). \quad (12)$$

Выполнение граничных условий (17) приводит к характеристическому уравнению

$$\mathrm{tg}(\lambda\,\rho_2)-\mathrm{tg}(\lambda\,\rho_1)=0, \quad (19)$$

решением которого является набор собственных чисел

$$\lambda_k=\frac{\pi k}{\rho_2-\rho_1}=\frac{\pi k}{l}, l=\rho_2-\rho_1, k=0,1,2,\dots. \quad (20)$$

Суперпозиция собственных функций, соответствующих собственным значениям λ_k

$$C(\rho,\tau)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{\lambda_k}}[A_k\sin(\lambda_k\,\rho)+B_k\cos(\lambda_k\,\rho)]e^{-\lambda^2\tau} \quad (21)$$

будет являться частным решением уравнения (3) и удовлетворять краевым условиям (17).

Коэффициент A_k, B_k найдем из разложения начального распределения (18) в ряд Фурье:

$$A_k = \frac{2}{l}\int_{\rho_1}^{\rho_2} \varphi(\rho)\sin(\lambda_k\rho)d\rho\,; \tag{22}$$

$$B_k = \frac{2}{l}\int_{\rho_1}^{\rho_2} \varphi(\rho)\cos(\lambda_k\rho)d\rho. \tag{23}$$

Окончательно решение краевой задачи (17), (18) для уравнения (3) в случае $Q^* = D$ имеет вид (21), при этом λ_k, A_k и B_k определяются из выражений (20), (22), (23) соответственно.

В заключении отметим, что параметр $b = \frac{D}{Q^*}$ — отношение коэффициента молекулярной диффузии к приведенному расходу жидкости линейного источника может принимать произвольные значения, и, поэтому собственные функции оператора, соответствующего дифференциальному уравнению (5), могут иметь вид [4]

$$R_k(\rho, \upsilon) = \rho^{\upsilon} Z_{\upsilon}\left(\sqrt{\frac{Q^*}{D}}\lambda_k\rho\right); \tag{24}$$

$$\upsilon = \pm\frac{Q^*}{2D}. \tag{25}$$

В этом более общем случае решения краевых задач для уравнения (3), приводят к трансцендентным характеристическим уравнениям, содержащим цилиндрические функции различного порядка, аналитическое решение которых, как правило, затруднено. Кроме того, процедура нормировки собственных функций $R_k(\rho, \upsilon)$ хотя и известна [5], но достаточно громоздка для инженерных расчетов.

Список источников

[1] Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. *Физико-математические основы фильтрации воды.* Москва, Мир, 1971, 451 с.

[2] Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С., Шержуков Б.С. *Гидродинамические свойства горных пород.* Москва, Недра, 1977, 271 с.

[3] Куликов А.Н. *Уравнение гидродинамической дисперсии и его общие интегралы.* Тула, ООО «Евразийское Научное Содружество», 1983, с. 15–20.

[4] Камке Э. *Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям.* Москва, Наука, 1976, 576 с.

[5] Арсенин В.Я. *Методы математической физики и специальные функции.* Москва, Наука, 1974, 431 с.

On a model of non-stationary one-dimensional hydrodynamic dispersion in an axisymmetric filtration flow

Kulikov Anatoly Nikolaevich kulikov.auat@bmstu.ru
Pashutin Maxim Mikhailovich pashutinmaksym@yandex.ru
Nikulin Matvey Andreevich nikulin.m4t@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper considers one of the special cases of the phenomenon of hydrodynamic dispersion, i.e., the migration of soluble substances during the movement of liquids through porous media. The proposed transport model takes into account only molecular diffusion and convective transport. General solutions for the corresponding differential equations have been obtained. An example of solving an edge problem with homogeneous conditions in elementary functions is provided, which can be used in solving many mathematical physics problems, including those with heterogeneous edge conditions.

Keywords: *mass transfer, hydrodynamic dispersion, convective diffusion, edge problems*

УДК 004.8:519.87:004.31

Моделирование соотношения «качество — производительность — энергоэффективность» для квантизированных трансформерных нейронных сетей на ПЛИС

Зобов Олег Валерьевич o.v.zobov@z-master.ru
SPIN-код: 7699-7709

ООО «Зетмастер», Москва, Россия

Рассмотрена математическая модель соотношения «качество — производительность — энергия» для квантизированных Vision Transformer с архитектурой Mixture-of-Experts на программируемых логических интегральных схемах. Представлены двухступенчатое квантование с репараметризацией нормализации по слоям в симметричное INT8 и потоковая архитектура с унифицированным ядром для плотных и разреженных операций. Показано, что для модели M3ViT при конфигурации 8/8/4 бит достигнуты потери точности <1 %, задержка 6,53 мс (ZCU102) и 9,28 мс (U280), энергоэффективность 31,2–37,9 GOPS/Вт. Сделаны выводы, что предложенная модель обеспечивает снижение энергии на инференс >78 % и рост пропускной способности до 5,18× относительно существующих ПЛИС-реализаций MoE. Результаты применяются для выбора Парето-оптимальных конфигураций ускорителей под ограничения по точности, задержке и энергопотреблению.

Ключевые слова: *Vision Transformer, Mixture-of-Experts, ПЛИС, квантование, математическое моделирование, энергоэффективность, аппаратные ускорители*

Введение. В статье рассматривается задача построения прогностической модели для квантизированных Vision Transformer [1] с архитектурой Mixture-of-Experts (MoE), реализуемых на ПЛИС. MoE-модели масштабируют емкость сети без пропорционального роста вычислительных операций за счет условной активации подмножества экспертов [2, 3], однако динамический выбор экспертов и разреженная структура усложняют аппаратную реализацию и прогнозирование соотношения между точностью вывода, производительностью и энергопотреблением.

Существующие ПЛИС-реализации трансформеров не учитывают специфику MoE-маршрутизации и опираются либо на плотные архитектуры с недоиспользованием ресурсов при разреженной активации, либо требуют агрессивного квантования, приводящего к значительным потерям точности [4, 5]. Настоящая работа предлагает компактную аналитическую модель «качество — производительность — энергия» (Q — P — E), связывающую параметры квантования и архитектурный параллелизм с метриками вывода, и демонстрирует ее применение для проектирования Парето-оптимальных конфигураций.

Материалы и методы. Двухступенчатое квантование. Для минимизации аппаратных накладных расходов применяется репараметризация post-LayerNorm квантования. Пусть $s \in \mathbb{R}^D$ и $z \in \mathbb{Z}^D$ — векторы масштабов

и нулевых точек по каналам; усредненный масштаб $\tilde{s} = E[s]$ позволяет перейти к по-слойному симметричному INT8. Трансформационные коэффициенты определяются как

$$r_1 = \tilde{s}/s,\ r_2 = z - 2^{(b-1)},$$

где b — разрядность квантования. Веса $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{(D \times D_out)}$ и смещения $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{D_out}$ последующего линейного слоя пересчитываются:

$$\mathbf{W'} = \mathrm{diag}(r_1)\mathbf{W},\ \mathbf{b'} = \mathbf{b} - \mathbf{W}^{\top}(s \odot r_2),$$

где $\odot$ — поэлементное произведение.

Для карт внимания после операции Softmax используется логарифмическая квантизация с основанием $\sqrt{2}$:

$$\mathbf{A}_q = \lfloor -2 \cdot \log_2 \mathbf{A} \rceil,$$

где $\mathbf{A} \in (0,1)^{(N \times N)}$ — матрица вероятностей внимания; N — число токенов.

Потоковая архитектура. Ядро многоголового внимания организовано как конвейер с поголовной обработкой и потоковой выборкой ключей/значений из внешней памяти; число обращений к памяти остается *O(1)* при наращивании параллелизма за счет широковещательной передачи запросов. Унифицированное линейное ядро совмещает плотные (MLP) и разреженные (MoE-эксперты) умножения матриц на векторы путем условного переключения потоков данных и повторного использования массива умножителей-накопителей между слоями.

Математическая модель Q — P — E. Введем параметры:

– b_W, b_A, $b_S \in \mathbb{N}$ — разрядности весов, активаций и карт внимания;

– p — число параллельных процессорных элементов;

– k — число активных экспертов (Top-k);

– $\rho \geq 1$ — коэффициент дисбаланса загрузки экспертов;

– N — число токенов (патчей изображения);

– D — размерность скрытого слоя.

Вычислительная сложность одного MoE-блока:

$$Ops_\mathrm{MoE} = 4ND^2 + 2N^2D + 8k\rho ND^2,$$

где $4ND^2$ — проекции запросов, ключей, значений и выходная проекция внимания; $2N^2D$ — формирование оценок внимания и умножение на значения; $8k\rho ND^2$ — вычисления в k активированных экспертах с учетом дисбаланса.

Задержка вывода блока:

$$L_\mathrm{blk} \approx \mathrm{ma}?(T_\mathrm{comp}, T_\mathrm{mem}) + T_\mathrm{over},$$

где $T_$comp = $Ops_$MoE / ($u \cdot C_$mac$\cdot f_$clk) — время вычислений; $T_$mem = = $Bytes_$off / $BW_$ext — время обмена с памятью; $T_$over — накладные расходы синхронизации.

Энергия на инференс кадра:

$$E = e_\mathrm{op} \cdot Ops_\mathrm{total} + e_\mathrm{mem} \cdot Bytes_\mathrm{total} + P_\mathrm{static} \cdot L_\mathrm{total},$$

где e_op — удельная энергия на операцию; e_mem — удельная энергия на обращение к памяти; P_static — статическая мощность; L_total — суммарная задержка вывода всех блоков модели; *Ops*_total и *Bytes*_total — суммарные операции и обмены для всей модели. Параметры e_op, e_mem, P_static калибруются по измерениям на 2–3 конфигурациях.

Потери точности. Предлагается эвристическая оценка вклада различных компонентов квантования:

$$\Delta Acc \approx \alpha_\mathrm{LN} \cdot \sigma^2_\mathrm{q,LN} + \beta_\mathrm{sf} \cdot \varepsilon_\mathrm{soft} + \gamma \cdot \sigma^2_\mathrm{q,lin},$$

где σ^2_q,LN — дисперсия шума квантования LayerNorm (σ^2_q ≈ s^2/12 для равномерного квантования); ε_soft — средняя относительная ошибка вероятностей post-Softmax; σ^2_q,lin — дисперсия шума квантования линейных слоев; α_LN, β_sf, γ — коэффициенты вклада, подгоняемые по калибровочному набору.

Реализация. Проектирование выполнено в Vitis HLS с последующим синтезом в Vivado v2025.2; модели M3ViT и ViT-B [1, 3]; калибровка квантования по 36 изображениям ImageNet-train; платы AMD Xilinx ZCU102 (DDR4) и Alveo U280 (HBM2).

Результаты. Для модели M3ViT при конфигурации *W/A/Attn = 8/8/4* снижение Top-1 составляет 0,31 п.п. относительно FP32-базы; для ViT-B — 0,49 п.п. Во всех случаях потери точности <1 %, что подтверждает адекватность предложенного квантования.

Производительность и энергоэффективность (измерения):

– **ZCU102, M3ViT-T**: задержка L = 6,53 мс, мощность P = 9,71 Вт, энергоэффективность η = 37,9 GOPS/Вт, энергия на инференс E = 0,067 Дж;

– **U280, M3ViT-S**: задержка L = 9,28 мс (≈108 FPS при пакетной обработке), мощность P = 34,2 Вт, η = 31,2 GOPS/Вт, E = 0,295 Дж.

Сравнение с ПЛИС-реализациями MoE. Относительно Edge-MoE (ZCU102) [6] достигнуто снижение энергии на инференс на 84 % (0,497 Дж → 0,067 Дж) и рост энергоэффективности в 7,24 раза. Задержка уменьшена в 1,58 раза по сравнению с HeatViT , энергоэффективность выше в 1,15–1,82 раза относительно представителей ViT-ускорителей на ПЛИС.

Сравнение с GPU. Относительно Nvidia V100S энергоэффективность выше в 1,6–3,1 раза при 54,3–66,9 % пропускной способности, что подтверждает перспективность ПЛИС для энергоограниченных применений.

Применение модели Q — P — E. Переход от k = 2 к k = 1 уменьшает *Ops*_MoE на $8ND^2$ и предсказуемо снижает задержку и энергию до момента насыщения пропускной способности памяти. Увеличение параллелизма p при фиксированном объеме переданных весов улучшает T_comp до предела утилизации u и рабочей частоты, что экспериментально подтверждено на U280 с двумя сверхлогическими областями.

Заключение. Представлена и верифицирована математическая модель соотношения «качество — производительность — энергия» для квантизированных MoE-архитектур Vision Transformer на ПЛИС. Для моделей семейства M3ViT и ViT-B при конфигурации 8/8/4 бит достигнуты потери точности <1 %, задержки 6,53–9,28 мс и энергоэффективность 31,2–37,9 GOPS/Вт. По-

лучены снижение энергии на инференс >78 % и рост пропускной способности до 5,18× относительно актуальных ПЛИС-реализаций MoE. Модель служит практическим инструментом для выбора Парето-оптимальных конфигураций ускорителей под заданные ограничения по точности, задержке и энергопотреблению. Перспективы включают расширение модели на трансформеры больших языковых моделей и автоматизацию совместной оптимизации квантования и архитектурного параллелизма.

Список источников

[1] Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2021. https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929

[2] Riquelme C., Puigcerver J., Mustafa B., Neumann M., Jenatton R., Pinto A. S., Keysers D., Houlsby N. Scaling vision with sparse mixture of experts. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2021, vol. 34, pp. 8583–8595.

[3] Liang H., Fan Z., Sarkar R., Jiang Z., Chen T., Cheng Y., Hao C., Wang Z. M³ViT: Mixture‑of‑experts vision transformer for efficient multi‑task learning with model‑accelerator co‑design. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2022, vol. 35, pp. 27441–27454.

[4] Lin Y., Zhang T., Sun P., Li Z., Zhou S. FQ‑ViT: Post‑training quantization for fully quantized vision transformer. *Proceedings of the 31st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2022, pp. 1173–1179.

[5] Li Z., Xiao J., Yang L., Gu Q. RepQ‑ViT: Scale reparameterization for post‑training quantization of vision transformers. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, pp. 17227–17236.

[6] Sarkar R., Liang H., Fan Z., Wang Z., Hao C. *Edge‑MoE: Memory‑efficient multi‑task vision transformer architecture with task‑level sparsity via mixture‑of‑experts.* 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.18691

Quality — performance — energy modeling for quantized moe architectures on FPGAs

Zobov Oleg Valerevich o.v.zobov@z-master.ru
SPIN-code: 7699-7709

LLC Zetmaster, Moscow, Russia

A quality — performance — energy relationship model for quantized Mixture — of — Experts Vision Transformers on field-programmable gate arrays is considered. Two — stage quantization with LayerNorm reparameterization to symmetric INT8 and a streaming architecture with unified dense/sparse kernels are presented. It is shown that for M3ViT model at 8/8/4-bit configuration, accuracy loss <1 %, latencies of 6.53 ms (ZCU102) and 9.28 ms (U280), and energy efficiency of 31.2–37.9 GOPS/W are achieved. It is concluded that the proposed model provides >78 % energy-per-inference reduction and up to 5.18× throughput gain over existing FPGA MoE implementations. The results can be applied for selecting Pareto-optimal accelerator configurations under accuracy, latency, and power constraints.

Keywords: *vision transformer, mixture-of-experts, FPGA, quantization, mathematical modeling, energy efficiency, hardware accelerators*

Секция 11. Информационные технологии. Информационно-вычислительные системы и комплексы

УДК 004.4

Разработка программного комплекса для проверки взаимодействия Modbus-устройств

Титов Александр Юрьевич titovayu@student.bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены принципы построения программного комплекса для проверки взаимодействия промышленных устройств, использующих протокол Modbus-TCP. Проведен краткий анализ особенностей протокола, описаны методы генерации и анализа пакетов, а также структура реализованного программного комплекса, предназначенного для автоматизированного тестирования контроллеров серии ПЛК. Рассмотрены примеры типичных ошибок обмена и способы их диагностики.

Ключевые слова: *Modbus, автоматизация тестирования, промышленная сеть, Python, ПЛК 500, протоколы связи*

Протокол Modbus является одним из наиболее распространенных средств обмена данными между промышленными устройствами. Несмотря на простоту структуры и открытость спецификаций, ошибки в реализации Modbus-взаимодействия встречаются достаточно часто, что может приводить к сбоям в управлении оборудованием [1].

В процессе разработки и тестирования программного обеспечения для контроллеров серии ПЛК 500 возникла необходимость в создании инструмента, обеспечивающего проверку корректности обмена пакетами Modbus и выявление возможных ошибок на ранних этапах создания прошивок под ПЛК.

Целью данной работы является автоматизация процесса выявления ошибок во взаимодействии Modbus-устройств посредством использования программного комплекса, реализующего анализ и контроль корректности обмена между клиентом и сервером по протоколу Modbus-TCP.

Особенности протокола Modbus-TCP. Modbus представляет собой протокол прикладного уровня, основанный на модели «запрос — ответ». Клиент инициирует обмен, формируя пакет с идентификатором транзакции, кодом функции и полем данных. Сервер обрабатывает запрос и возвращает ответ, который может содержать либо полезную информацию, либо код ошибки [2]. Для Modbus-TCP структура пакета (Application Data Unit, ADU) включает (рис. 1):

– Transaction Identifier (2 байта) — уникальный идентификатор запроса;
– Protocol Identifier (2 байта) — всегда 0 для Modbus-TCP;
– Length (2 байта) — длина последующих данных;
– Unit Identifier (1 байт) — адрес устройства;
– Function Code (1 байт) — код выполняемой операции;
– Data (n байт) — параметры запроса или ответ.

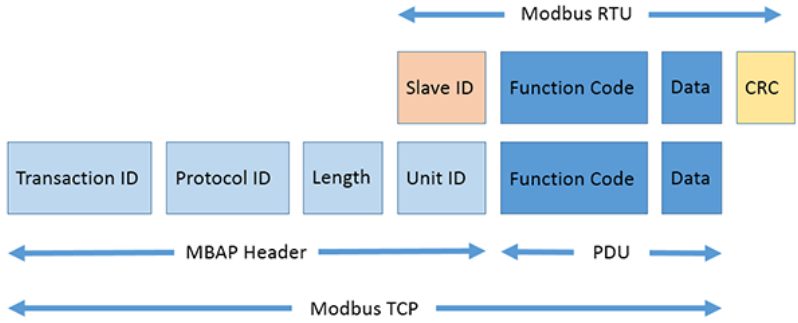


Рис. 1. Modbus TCP структура

Простота формата делает протокол удобным для диагностики, однако также повышает риск ошибок при формировании или обработке пакетов. К наиболее типичным проблемам относятся [3]:

– использование неверного порядка байт (big/little endian);

– некорректная обработка Function Code;

– несоответствие длины пакета заявленной длине;

– задержки при многократных запросах.

Архитектура программного комплекса. Программный комплекс реализован на языке Python 3 с использованием библиотек PySide6 (для интерфейса) и PyModbus (для сетевого взаимодействия). Система построена по модульному принципу и включает следующие компоненты (рис. 2):

– интерфейс пользователя (GUI) — позволяет формировать сценарии тестирования, выбирать тип соединения, задавать диапазоны адресов и команд;

– Modbus-клиент — отвечает за генерацию и отправку запросов, поддержку функций чтения и записи регистров, а также контроль таймингов;

– сервер ПЛК — ПЛК-устройство необходимое для отладки ПО;

– менеджер сценариев — загружает, сохраняет и проверяет сценарии в формате JSON.

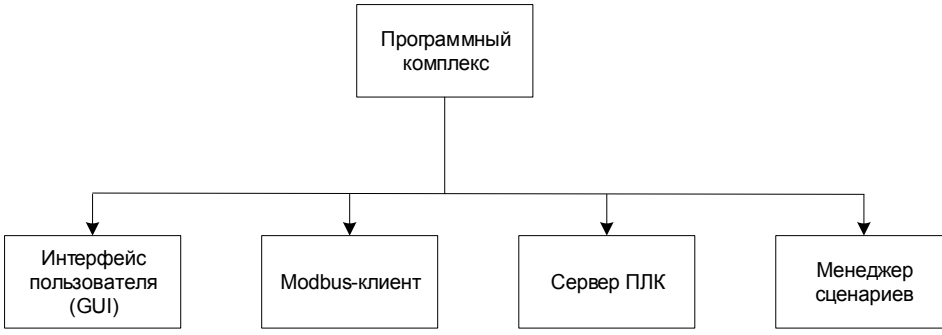


Рис. 2. Архитектура программного комплекса

Такой подход обеспечивает простоту модификации и расширения системы. Каждый сценарий содержит последовательность запросов, параметры задержек и ожиданий, а также контрольные значения для проверки ответов [4].

Генерация и анализ пакетов. Формирование пакета Modbus выполняется по шаблону, включающему адрес устройства, код функции, количество регистров и набор данных. Пример типичного запроса: 01 03 00 00 00 02 C4 0B (чтение двух регистров начиная с адреса 0).

В процессе анализа ответов программный комплекс выполняет:

– проверку совпадения идентификатора транзакции;

– контроль длины и структуры пакета;

– сравнение полученных данных с ожидаемыми;

– обработку исключений (Exception Codes 01–08).

Пример типичной ошибки: устройство возвращает код функции 0x83 (ошибка при исполнении 0x03), что указывает на неверный диапазон адресов.

Результаты тестирования. Использование данного ПО позволило выявить ряд ошибок в прошивках ПЛК 500:

– неправильная обработка функции 0x10 (Write Multiple Registers);

– некорректное завершение соединения при потере пакета;

– зависание интерфейса при превышении тайм-аута ответа;

– смешение адресов входных и выходных регистров.

Пример JSON-сценария для тестирования:

```
{
"method": "Чтение регистров",
"function": 3,
"start": 0,
"count": 2,
"expected": [123, 456]
}
```

Логирование запросов и ответов позволяет анализировать взаимодействие и документировать результаты.

Заключение. Разработанный программный комплекс обеспечивает возможность автоматизированной проверки взаимодействия Modbus-устройств. Применение открытых библиотек и модульной архитектуры позволяет адаптировать систему под различные типы контроллеров и сетевых топологий. Результаты испытаний показали эффективность подхода при тестировании контроллеров серии ПЛК 500, особенно на этапах отладки протокольных стеков. В дальнейшем планируется расширение функционала системы: добавление поддержки Modbus-RTU, интеграция с анализом функциональных блоков и экспорт отчетов в форматах CSV.

Список источников

[1] Исаков Н.С., Кукарцев А.М. О проектировании испытательного программного обеспечения для Modbus/TCP-устройств. *Решетневские чтения: матер.* Красноярск, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2016, т. 2, с. 265–266.

[2] Ногаев А.А., Коваленко А.Н. Разработка системного программного обеспечения связи базы данных с объектом управления на основе протокола Modbus. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2015, т. 1, № 11, с. 467–468.

[3] Узбеков И. Протокол Modbus. *Трибуна ученого*, 2019, № 7, с. 16–20.

[4] Дубиковская Е.В., Гринюк Д.А., Чепурко М.В., Арпентний Д.О. Инструменты расширения возможностей программируемых логических контроллеров. *Нефтегазохимия–2023. VI Междунар. науч.-техн. форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке: матер.* Минск, Белорусский государственный технологический университет, 2023, с. 254–258.

Development of a software package for checking the interaction of Modbus devices

Titov Alexander Yurievich tayu20ki252@student.bmstu.ru

Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article discusses the principles of building a software package for verifying the interaction of industrial devices using the Modbus-TCP protocol. A brief analysis of the protocol features is given, methods of packet generation and analysis are described, as well as the structure of the implemented software package, designed for automated testing of PLC series controllers. Examples of typical exchange errors and ways to diagnose them are considered.

Keywords: *modbus, test automation, industrial network, Python, PLC 500, communication protocols*

УДК 004.414.28

Универсальная образовательная платформа EduCity

Кузин Егор Максимович kuzinem@student.bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Выделены основные задачи, которые необходимо решить для организации эффективного образовательного процесса. Разработана архитектура универсальной образовательной площадки, инкапсулирующей необходимые инструменты решения выделенных задач. Описаны модули, входящие в состав архитектуры. Сделаны выводы о сильных сторонах разработанной архитектуры, а также о программном решении, реализующем описанную архитектуру. Сформулирована стратегия дальнейшего развития платформы.

Ключевые слова: *расширяемая архитектура, WYSIWYG-редактор, централизованная информационная база, ролевая модель доступа, агрегация статистических данных, анализ ошибок и трекинг прогресса*

Введение. Вопрос совершенствования подходов в образовании является актуальным на данный момент. Один из основных методов — цифровизация образовательного процесса — открывает доступ к большому количеству возможностей: от комплексного анализа прогресса обучающегося до предоставления полной информационной базы всем субъектам образовательной системы [1]. Разработка технологических решений в данной области решает ключевые проблемы организации процесса обучения и способствует развитию образования.

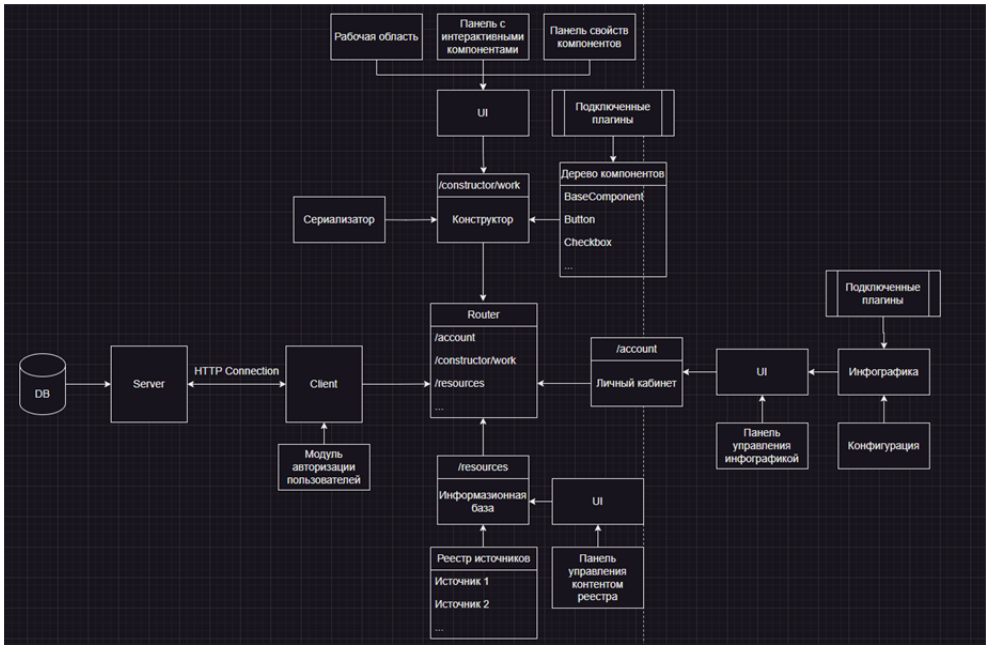
На данный момент существует множество платформ, которые специализируются на решении спектра частных задач. Большое количество специализированных средств создает проблему фрагментации, что обуславливает необходимость унификации и создания универсального инструмента, позволяющего решить любую задачу образовательного процесса.

Цель работы — объединить возможности разных площадок в одном продукте, позволяющем гибко организовывать учебный процесс.

Разработка архитектуры. Для удовлетворения потребностей большинства образовательных организаций и решения большого класса задач необходимо создать «песочницу», которая позволяет наиболее общим образом управлять необходимыми ресурсами. Оптимальным решением является создание web-приложения — такой формат дает возможность в любое время быстро получать доступ к платформе, используя любое устройство. Удобно реализовать ролевую систему пользователей, которая позволит определять возможности пользователей. Например, роль «преподаватель» позволяет пользоваться редактором заданий, объединять пользователей с ролью «учащийся» в группы, выдавать этим пользователям задания и следить за их ста-

тистикой. Пользователи с ролью «учащийся» могут проходить соответствующие задания и пользоваться информационными источниками реестра.

Учебный процесс можно условно разделить на несколько сегментов, характерных для большинства систем: составление и решение заданий по дисциплинам, анализ ошибок и прогресса обучающегося, централизованная информационная база (см. рисунок).



Архитектура платформы EduCity

Работа с задачами. В качестве универсального инструмента составления задач, домашних и проверочных работ отлично подойдет WYSIWYG-редактор с технологией Drag-and-drop [2]. Расширяемость подразумевает наличие дерева визуальных компонентов (например, кнопок и чекбоксов), наследующихся от абстрактного класса интерактивного UI-компонента [3]. Архитектуру редактора заданий можно разделить на несколько элементов:

– дерево UI-компонентов, в основе которого лежит абстрактный класс интерактивного компонента, реализующего DnD-методы и методы взаимодействия. Все остальные компоненты наследуются от абстрактного класса и расширяют его интерфейс. Такой подход позволяет добавлять новые UI-компоненты с помощью плагинов;

– интерфейс редактора, включающий в себя рабочую область, в которой пользователь размещает компоненты, и панели с UI-компонентами и их свойствами, позволяющими стилизовать компоненты;

– алгоритм сериализации. Удобно представлять формируемый пользователем интерфейс с помощью стандартизированной схемы, хранящейся в формате JSON. Алгоритм получает на вход виртуальное дерево компонентов рабочей области и сериализует его в JSON-файл, который далее загружается в базу данных. Противоположный алгоритм десериализации (сборщик интерфейса) получает на вход схему в формате JSON из БД и строит виртуальное дерево компонентов.

Анализ ошибок и трекинг прогресса обучающегося значительно облегчается путем добавления кастомизируемой статистики пользователя, включающей показатели количества правильно и неправильно решенных заданий и задач, среднюю точность решения, относительный уровень знаний и другие [4]. Статистика пользователя расположена в личном кабинете и агрегирует данные о его успеваемости и результативности. Здесь расположена инфографика, которую можно стилизовать и настраивать (в том числе с помощью плагинов): добавить показатели, отражающие любые значения в БД о данном пользователе, а также удалить ненужные. Доступ к этой инфографике имеют сам пользователь, а также любой пользователь с ролью «преподаватель», к которому привязан данный учащийся.

Централизированная информационная база подразумевает наличие реестра рекомендуемых источников по дисциплинам. Гибкость достигается возможностью добавлять и исключать источники, тем самым поддерживая актуальность и полноту предоставляемой учащимся информации. Реестр представляет собой коллекцию источников, хранящихся в БД, и панель управления, позволяющей добавлять новые источники, редактировать существующие и удалять ненужные. Размещение контента в этом реестре проходит модерацию со стороны пользователей с ролью «модератор».

Заключение. На данный момент в рамках проекта реализован функциональный прототип платформы EduCity. В процессе тестирования были выявлены недостатки реализации. Дальнейшая разработка предполагает исправление недостатков, отладку и калибровку основных функций. Разработанная платформа является универсальным инструментом, решающим большой спектр задач, связанных с организацией образовательного процесса. Масштабируемая архитектура позволяет расширять платформу и адаптировать ее к новым задачам.

Список источников

[1] Qayyum A. *Assessing the Digital Transformation of Education Systems: An International Comparison*. Handbook of Open, Distance and Digital Education. Springer, 2023, pp. 249–266.

[2] Халиманенков А.С. Использование функциональности Drag-n-Drop на языке JavaScript. *Постулат*, 2022, № 1(75), с. 55.

[3] Freeman A. *Pro React 16*. Apress, 2019, pp. 393–400.

[4] Molenaar I., Knoop-van Campen C. How Teachers Make Dashboard Information Actionable. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2018, no. 12(3), pp. 347–355.

EduCity, a universal educational platform

Kuzin Egor Maximovich kuzinem@student.bmstu.ru
Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The key challenges that must be addressed to organize an effective educational process are identified. The architecture of a universal educational platform encapsulating the necessary tools for solving these challenges is developed. The modules comprising the architecture are described. Conclusions are drawn regarding the strengths of the developed architecture, as well as the software solution implementing it. A strategy for further platform development is formulated.

Keywords: *extensible architecture, WYSIWYG editor, centralized information base, role-based access model, statistical data aggregation, error analysis and progress tracking*

УДК 378:004.032.26

Использование технологий искусственного интеллекта в диагностике и исследовании меланом кожи

Ковров Данила Александрович kovrovdanila@gmail.com
Борсук Наталья Александровна borsuk65@yandex.ru
Задоркин Сергей Михайлович zadorkinsm@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено применение искусственных нейронных сетей в задачах раннего выявления меланомы кожи. Представлены современные подходы к диагностике с использованием сверточных нейронных сетей и методов машинного обучения. Показано, что внедрение алгоритмов искусственного интеллекта позволяет значительно повысить точность классификации дерматологических изображений, снижая влияние человеческого фактора и ускоряя постановку диагноза. Сделаны выводы, что данные технологии могут применяться для разработки автоматизированных диагностических систем, повышающих эффективность медицинских исследований и качество раннего лечения.

Ключевые слова: *меланома, нейронная сеть, машинное обучение, диагностика, искусственный интеллект, компьютерное зрение*

Меланома представляет собой одну из наиболее опасных форм рака кожи, характеризующуюся высокой скоростью прогрессирования, склонностью к метастазированию и значительным уровнем смертности при позднем выявлении [1]. По статистике Министерства здравоохранения Российской Федерации заболеваемость меланомой за последние годы продолжает расти, а смертность остается на стабильно высоком уровне. Несмотря на развитие традиционных методов диагностики, визуальная оценка врачом во многом зависит от субъективных факторов и уровня квалификации специалиста. Ошибки на ранней стадии нередко приводят к позднему обращению за помощью, что снижает эффективность последующего лечения. В то же время при своевременном выявлении и хирургическом удалении меланомы прогноз является благоприятным — показатели выживаемости достигают 95–100 %.

В последние годы активно развиваются методы, основанные на машинном обучении и нейронных сетях, которые демонстрируют высокую точность при анализе дерматологических изображений [2, 3]. Искусственные нейронные сети, в частности сверточные (Convolutional Neural Networks, CNN), применяются для выделения структурных особенностей изображения, анализа цвета, формы и текстуры пигментных образований. Такие подходы позволяют автоматизировать процесс диагностики и снизить влияние человеческого фактора. Кроме того, нейросетевые алгоритмы способны обучаться на больших массивах данных, формируя универсальные признаки, что делает их особенно полезными для анализа медицинских изображений, где присутствует высокая вариативность визуальных характеристик.

Важным направлением развития медицинских технологий является интеграция нейронных сетей в специализированные программные комплексы. Подобные системы, обученные на тысячах изображений новообразований, способны классифицировать меланому не хуже, а в ряде случаев — даже лучше опытных врачей-дерматологов [3]. Примеры таких решений включают использование архитектур MobileNetV2, ResNet и VGGNet. Первая ориентирована на мобильные устройства и демонстрирует высокую скорость распознавания при минимальных вычислительных ресурсах. ResNet использует остаточные связи, позволяющие эффективно обучать глубокие модели без потери точности, а VGGNet отличается глубокой структурой, обеспечивающей высокую точность при обработке изображений. Совокупное применение этих архитектур позволяет достигать точности определения злокачественности новообразований до 95 %, что делает их перспективными инструментами в телемедицине и клинической диагностике.

Одним из ключевых факторов успешного обучения нейронных сетей является наличие большого количества качественных данных. Однако доступные открытые базы изображений, например ISIC Archive [4], часто содержат шумы, артефакты и несбалансированные классы изображений, что затрудняет процесс обучения. Эти проблемы решаются с помощью предварительной обработки данных, включающей коррекцию яркости, нормализацию, удаление шумов и выделение контуров. Сверточные нейронные сети способны самостоятельно извлекать локальные признаки, минимизируя влияние некачественных элементов изображения, что делает их устойчивыми к вариациям освещения, текстуры и угла съемки.

Важным аспектом является также объяснимость решений нейронных сетей. В медицинской практике крайне важно, чтобы врач мог интерпретировать, на основании каких признаков алгоритм принял решение о наличии меланомы. Для этого применяются методы визуализации карт активации (например, Grad-CAM), позволяющие выделить области изображения, наиболее значимые для классификации. Это повышает доверие специалистов к результатам и способствует внедрению систем искусственного интеллекта в клиническую практику.

Проведенные исследования подтверждают, что использование сверточных нейронных сетей в диагностике меланомы позволяет повысить точность классификации и скорость обработки изображений [5]. Разработанные решения обеспечивают возможность создания интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений и инструментов самодиагностики для пользователей. Такие технологии уже применяются в зарубежных и отечественных разработках, где обеспечивают эффективный скрининг и предварительный анализ изображений кожи. Использование нейросетей позволяет снизить нагрузку на врачей, повысить оперативность анализа и минимизировать вероятность пропуска злокачественных изменений.

Сочетание искусственного интеллекта и клинических методов анализа открывает новые возможности для повышения качества и доступности медицинской помощи. В перспективе возможно создание комплексных систем,

объединяющих визуальную диагностику, прогнозирование динамики заболевания и подбор персонализированных схем лечения.

Нейросетевые технологии представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в современной медицинской информатике. Их внедрение в клиническую практику способно не только улучшить раннее выявление меланомы, но и существенно снизить уровень смертности, обеспечивая своевременное начало терапии. Дальнейшие исследования направлены на совершенствование архитектур нейронных сетей, повышение точности моделей на реальных клинических данных и создание адаптивных систем, способных обучаться в процессе эксплуатации. Все это делает использование искусственного интеллекта важнейшим инструментом в формировании новой парадигмы цифрового здравоохранения.

Список источников

[1] Министерство здравоохранения Российской Федерации. *Онкологическая статистика за 2024 год.* URL: https://oncology.ru/news/2024/04/22/ (дата обращения 17.10.2025).

[2] Гидранович А.В., Луд Н.Г., Шляхтунов Е.А., Луд Л.Н., Жуковец А.Г., Прокошин А.В., Кожар В.Л. Перспектива использования экспертных систем в ранней диагностике меланомы кожи. *Вестник ВГМУ*, 2015, № 2(14), с. 46–55.

[3] Haenssle H.A., Fink C., Schneiderbauer R., Toberer F., Buhl T., Blum A., Kalloo A. A., Hassen A.B.H., Thomas L., Enk A., Uhlmann L. Man against machine: diagnostic performance of a deep learning convolutional neural network for dermoscopic melanoma recognition in comparison to dermatologists. *Annals of Oncology*, 2018, vol. 29, no. 8, pp. 1836–1842.

[4] *International Skin Imaging Collaboration (ISIC) Archive.* URL: https://isic-archive.com/ (accessed 17.10.2025).

[5] Козлов С.В., Неретин Е.Ю., Куколкина В.В. Применение машинного зрения в цифровой дерматоскопии при подозрении на меланому кожи. *Саратовский научно-медицинский журнал*, 2014, № 2(10), с. 6–10.

Application of artificial intelligence technologies in skin melanoma diagnosis and research

Kovrov Danila Alexandrovich kovrovdanila@gmail.com
Borsuk Natalya Aleksandrovna borsuk65@yandex.ru
Zadorkin Sergey Mikhailovich zadorkinsm@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper examines the use of artificial neural networks for early detection of skin melanoma. Modern diagnostic methods based on convolutional neural networks and machine learning are presented. It is shown that artificial intelligence algorithms significantly improve the accuracy of dermatological image classification, reducing human error and speeding up diagnosis. The study concludes that these technologies can be applied to create automated diagnostic systems that enhance the effectiveness of medical research and early treatment quality.

Keywords: *melanoma, neural network, machine learning, diagnosis, artificial intelligence, computer vision*

УДК 004.04

Цифровая платформа для проектирования распределительных пунктов в городских электросетях

Задоркин Сергей Михайлович zadorkinsm@student.bmstu.ru
Борсук Наталья Александровна borsuk@bmstu.ru
Ковров Данила Александрович kovrovdanila@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено актуальное направление автоматизации проектирования в электроэнергетике. Представлена разработка специализированного веб-приложения для проектирования распределительных пунктов городских электросетей. Показаны ключевые функциональные возможности приложения, включая работу с библиотекой типовых компонентов, модуль свободного проектирования, автоматизированные проверки и расчеты, а также экспорт результатов. Сделаны выводы, что данное решение позволяет сократить затраты и время проектирования, минимизировать ошибки и может применяться для обучения персонала и интеграции в существующие другими системы электросетевых компаний.

Ключевые слова: *распределительный пункт электросети, PDF-формат JSON-формат, веб-приложение, цифровизация*

Современное проектирование в электроэнергетике, в частности сложных объектов, таких как распределительные пункты (РП), до сих пор остается в значительной степени трудоемким и ресурсозатратным процессом, что во многом обусловлено сохранением архаичных методов работы [1]. Зачастую исходные данные предоставляются в виде устаревших бумажных чертежей или их отсканированных копий, а применение универсальных графических редакторов, не адаптированных под специфические отраслевые задачи, сопряжено с целым комплексом существенных недостатков. К ним относятся критическое отсутствие готовых библиотек специализированных, стандартизированных компонентов, необходимость трудоемкой самостоятельной настройки всех элементов схемы и полное отсутствие встроенных механизмов для автоматизации инженерных расчетов и проверок на корректность, что в совокупности не только замедляет работу, но и повышает риски возникновения ошибок на критически важных этапах проектирования.

Данные проблемы обуславливают острую необходимость создания и внедрения высокоспециализированного программного обеспечения, способного кардинально трансформировать и оптимизировать существующие подходы к проектированию. В данной работе подробно рассматривается процесс разработки такого решения — современного веб-приложения, предназначенного для комплексной автоматизации проектирования объектов электроэнергетики, в первую очередь в контексте городских распределительных сетей. Его основная стратегическая цель заключается в достижении значи-

тельного снижения производственных затрат и радикального ускорения вывода конечной продукции на рынок, что становится возможным благодаря реализации принципов глубокого, детализированного моделирования в полностью виртуальной среде, а также в существенном повышении качества контроля на всех стадиях проекта и эффективности обучения технического персонала.

Ключевой функционал данного веб-приложения для проектирования РП 10(6) кВ включает в себя, прежде всего, модуль интуитивного проектирования, основанный на применении технологии Drag-and-Drop [2] для сборки принципиальных схем из готовых элементов, что предоставляет пользователю возможность гибко манипулировать компонентами и оперативно редактировать их многочисленные атрибуты. Этот модуль тесно интегрирован с обширной библиотекой типовых, инженерно-проверенных решений, содержащей структурированную базу данных стандартизированных компонентов, таких как вакуумные выключатели, что не только минимизирует рутинные операции, но и существенно ускоряет весь процесс проектирования, обеспечивая его стандартизацию.

Для обеспечения максимальной гибкости и универсальности при работе с уникальными или нестандартными конфигурациями в приложении предусмотрен расширенный модуль свободного проектирования, позволяющий инженерам создавать и редактировать компоненты вручную, в ситуациях, когда в типовой библиотеке отсутствуют подходящие аналоги. Дополнительно, для повышения удобства визуализации и упрощения процесса оцифровки данных, реализован комплексный инструмент работы с шаблонами, включающий функцию импорта отсканированных чертежей в распространенных растровых форматах, таких как JPG и PNG, которые используются в качестве подложки с возможностью их интерактивного перемещения, точного масштабирования и обрезки.

Наиболее важным аспектом, отличающим данное решение от простых графических редакторов, является встроенная система автоматизированных проверок и инженерных расчетов, которая включает в себя интеллектуальный модуль самопроверки, проактивно исключающий потенциальные ошибки: приложение в автоматическом режиме осуществляет проверку логической корректности всей схемы в целом, например, анализируя соответствие типа ячейки и установленного в ней коммутационного аппарата, с наглядным выделением обнаруженных несоответствий красной сигнальной обводкой. Кроме того, приложение обладает развитыми функциями экспорта и импорта данных, позволяя выгружать готовую схему в стандартный PDF-формат для отчетности и согласований, а также сохранять и загружать все настройки проекта в виде структурированного JSON-файла, что обеспечивает преемственность работы, плюс к этому реализована функция автоматического формирования опросных листов для заводов-изготовителей оборудования.

Технологический стек реализации был выбран с ориентацией на современные веб-стандарты и включает использование языка TypeScript и библио-

теки React для построения клиентской части, что обеспечивает строгую типизацию, высокую производительность рендеринга и создание отзывчивого пользовательского интерфейса [3], в то время как серверная часть, построенная на надежной платформе, отвечает за безопасную авторизацию пользователей, централизованное хранение данных и гибкую ролевую модель, которая четко разграничивает права доступа, такие как базовый просмотр, полное проектирование и разрешение на экспорт.

Что касается перспектив развития, то в ближайших планах стоит внедрение возможности частичной оффлайн-работы через использование передовой технологии PWA (Progressive Web App) [4], а также более глубокая детализация иерархической ролевой модели с выделением специфических прав и функциональных возможностей для различных категорий пользователей, таких как рядовые операторы, инженеры-проектировщики и начальники отделов, наделенные функциями администрирования и утверждения.

Таким образом, представленное веб-приложение, в силу своей комплексности и специализации, способно стать оптимальным и высокоэффективным решением для проектирования электросетей, позволяя не только многократно ускорить и значительно удешевить процесс, но и кардинально повысить его итоговое качество и надежность за счет глубоко интегрированных алгоритмических проверок и точных расчетов, а наличие обширной базы типовых решений, строго соответствующих актуальным требованиям ГОСТ, делает его универсальным, стандартизированным и широко применимым инструментом для большинства электросетевых компаний на территории Российской Федерации, в то время как заложенный потенциал для интеграции с другими корпоративными системами, такими как ERP и САПР, открывает дополнительные стратегические возможности для формирования целостной и сквозной цифровой экосистемы предприятия.

Список источников

[1] Назаревич С.А. Автоматизация процессов прогнозирования развития сложных технических систем. *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*, 2019, № 1(3), с. 29–33.

[2] *HTML Drag and Drop API.* URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/HTML_Drag_and_Drop_API (accessed 12.10.2025).

[3] Газизуллин Н.И., Плещинская И.Е. Разработка клиентской части веб-приложения с использованием технологий spa. *StudNet*, 2020, № 8, с. 104–110.

[4] Газизуллин Н.И., Плещинская И.Е. Разработка прогрессивного веб-приложения с помощью технологии PWA. *StudNet*, 2020, № 8, с. 620–625.

A digital platform for designing distribution points in urban power grids

Zadorkin Sergey Mikhailovich zadorkinsm@student.bmstu.ru
Borsuk Natalia Alexandrovna borsuk@bmstu.ru
Kovrov Danila Alexandrovich kovrovdanila@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The current direction of design automation in the electric power industry is considered. The development of a specialized web application for designing distribution points of urban power grids is presented. The key functionality of the application is shown, including working with a library of standard components, a free design module, automated checks and calculations, as well as exporting results. It is concluded that this solution reduces design costs and time, minimizes errors, and can be used for staff training and integration into existing electrical grid systems.

Keywords: *power distribution point, PDF-JSON format, web application, digitalization*

УДК 004.9

Исследование эффективности численных методов интегрирования функций посредством алгоритмов, реализованных на Python и Go

Силаева Екатерина Максимовна silaevaem@student.bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Настоящая работа посвящена сравнительному исследованию характеристик быстродействия численных методов вычисления определенных интегралов, используемых в прикладных областях науки и техники, таких как физика, механика, математика и вычислительная статистика. Рассмотрены реализации классического метода Симпсона на современных языках программирования Python и Go. Метод Симпсона выбран ввиду его простоты и распространенности, что позволяет объективно оценить влияние особенностей реализации языков программирования на скорость и качество вычислений.

Ключевые слова: *численное интегрирование, метод Симпсона, Python, Go, алгоритмы численных методов*

Определенные интегралы используются в различных сферах: физика, инженерия, экономика, а также машинное обучение [1]. На практике существуют примеры, когда вычислить интеграл с помощью аналитического метода невозможно, поэтому численные методы — это незаменимый инструмент для решения реальных задач [2].

В последние годы интерес к такому языку, как Go, только растет. А также его начинают использовать не только, как инструмент для веб-разработке, но и для решения задач с большим количеством математики [3]. Такой язык как Python является простым и быстрым для решения проблем разного типа, а также имеет многообразие библиотек [4]. Оба языка являются популярными среди разработчиков, поэтому актуальным является сравнение производительности расчетов с использованием этих двух языков на примере вычисления, например определенных интегралов.

Для вычисления определенного интеграла применим метод Симпсона или метод параболы. Данный метод Симпсона состоит в том, чтобы заменить подынтегральную функцию не прямыми линиями, а квадратичными параболами. Если взять нелинейную функцию $f(x)$ на отрезке $[a, b]$, то метод Симпсона приближает ее последовательностью парабол, каждая из которых проходит через соседние точки.

Для вычисления определенного интеграла возьмем простую интегральную функцию $f(x)=\sin(x)$ на интервале от 0 до π. Ниже продемонстрированы вычисления интегралов на Python и Go.

Подход на Python это ручная реализация метода Симпсона, которая демонстрирует классический алгоритм численного интегрирования с фиксиро-

ванными количеством разбиений. Особенностью данной реализации является использование миллиона разбиений, что обеспечивает высокую точность, но приводит к значительному количеству вычислений функции. Интересно, что в этой реализации используется math.sin вместо numpy.sin, что влияет на производительность, поскольку NumPy оптимизирован для векторных операций, а math работает со скалярными значениями. Для того чтобы вычислить время выполнения программы используем библиотеку time.

Go-реализация метода Симпсона структурно очень похожа на Python-версию, но демонстрирует характерные особенности статически типизированного компилируемого языка. Явное объявление типов для всех переменных и параметров функции, а также необходимость явных преобразований типов (как в float64(n)) — отличительные черты Go-подхода. Компиляция в нативный код обеспечивает более эффективное выполнение циклов по сравнению с интерпретируемым Python, что может давать преимущество в производительности при большом количестве итераций. Важно отметить, что Go-версия включает дополнительную проверку на четность количества разбиений, автоматически корректируя этот параметр при необходимости.

Сравним два этих подхода для решения интегрального уравнения. Адаптивный алгоритм SciPy показывает наилучшие результаты, несмотря на то, что выполняется в интерпретируемой среде. Это достигается за счет использования оптимизированных низкоуровневых библиотек и интеллектуального адаптивного подхода, который минимизирует количество вычислений функции. Ручные реализации на обоих языках требуют существенно больше вычислений, но демонстрируют разную эффективность — компилируемый Go обычно показывает лучшее время выполнения благодаря оптимизациям на уровне компилятора.

Для того чтобы в этом убедиться в этом, проанализируем результаты работы кодов. Как и ожидалось код на Go работает быстрее, чем код на Python (время вычисления одного и того же интеграла составляет соответственно 0.008032 и 0.189465 с).

Проведенное сравнение показало принципиальные различия в характеристиках эффективности численных методов интегрирования на разных языках программирования. Несмотря на высокое удобство разработки и обширную экосистему научных инструментов, Python все еще ограничен недостаточной производительностью базовых интерпретационных компонентов.

Язык Go, напротив, благодаря своей компилируемости и эффективной поддержке оптимизаций, достигает заметного выигрыша в вычислительном процессе. Результаты исследования подтверждают целесообразность выбора соответствующего инструмента программирования исходя из конкретной решаемой задачи.

Список источников

[1] Горбунов М.В. Механические приложения определенного интеграла. *Студенческий*, 2022, № 13-1(183), с. 48–51.

[2] Потапенкова А.В., Ильичев В.Ю. Вычисление площади фигуры методом трапеций. *Наукоемкие технологии в приборо-и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Регион. НТК: матер.* Калуга, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 303–305.

[3] Дацун Н.Н., Манюкова Н.В., Уразаева Л.Ю. Современные тренды развития языков программирования на примере языка Go. *Преподавание информационных технологий в Российской Федерации. XX Открыт. Всерос. конф.: сб. тр.* Москва, ООО «1С-Паблишинг», 2022, с. 134–135.

[4] Ильичев В.Ю. Применение библиотеки OpenCV языка Python для распознавания образов объектов. *Системный администратор*, 2021, № 7-8(224-225), с. 130–132.

Investigating the effectiveness of numerical methods for integrating functions through algorithms implemented in Python and Go

Silaeva Ekaterina Maximovna silaevaem@student.bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This work is devoted to a comparative study of the performance characteristics of numerical methods for calculating certain integrals used in applied fields of science and technology, such as physics, mechanics, mathematics and computational statistics. Implementations of the classic Simpson method in modern Python and Go programming languages are considered. Simpson's method was chosen because of its simplicity and prevalence, which makes it possible to objectively assess the impact of the implementation of programming languages on the speed and quality of calculations.

Keywords: *numerical integration, Simpson method, Python, Go, algorithms of numerical methods*

УДК 004.057.4

Экспериментальный анализ и сравнение протоколов передачи данных для IoT-устройств: MQTT и HTTP

Осипов Андрей Александрович osipovaa@student.bmstu.ru
Винокуров Алексей Алексеевич vinokurovaa1@student.bmstu.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено экспериментальное сравнение производительности протоколов MQTT и HTTP на примере метеостанции на базе ESP32. Представлено описание архитектуры аппаратного и программного комплекса, методика и результаты тестирования. Показано, что использование MQTT позволяет снизить среднюю задержку передачи данных более чем в 12 раз по сравнению с HTTP, что особенно важно для энергоэффективных устройств мониторинга окружающей среды. Выводы исследования способствуют выбору оптимального протокола для IoT-проектов с критичными требованиями к скорости и надежности системы передачи телеметрии.

Ключевые слова: *IoT, протокол передачи данных, метеостанция, latency, производительность*

Современные системы Интернета вещей (IoT) предъявляют высокие требования к эффективности передачи данных между распределенными устройствами [1, 2]. Важными характеристиками таких систем являются не только высокая надежность передачи данных, но и минимальное энергопотребление. Это особенно важно для устройств, работающих в автономном режиме с ограниченным источником питания [3]. Для автономных метеостанций критичны параметры энергопотребления и задержки обмена сообщениями. Среди множества сетевых протоколов особое внимание стоит отдать сравнительному анализу классического HTTP (HyperText Transfer Protocol) [4] и специализированного для IoT-приложений легковесного протокола MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [5]. Выбор оптимального протокола для реализации распределенных узлов в реальных условиях эксплуатации обеспечивает оптимальное использование IoT-устройств. Для ответа на вопрос: «Какой протокол передачи данных лучше выбрать?» была разработана лабораторная установка метеостанции на основе микроконтроллера ESP32 со встроенным Wi-Fi-модулем [6].

Выбор данного микроконтроллера обусловлен гибкостью и портативностью итоговой системы. Данная установка собирает данные с датчиков (температура, влажность, давления) и отправляет их на сервер в формате JSON-пакета. Сама же серверная часть была написана с помощью платформы ASP.NET Core с интеграцией брокера Eclipse Mosquitto для передачи данных через MQTT (рис. 1 и 2) [7].

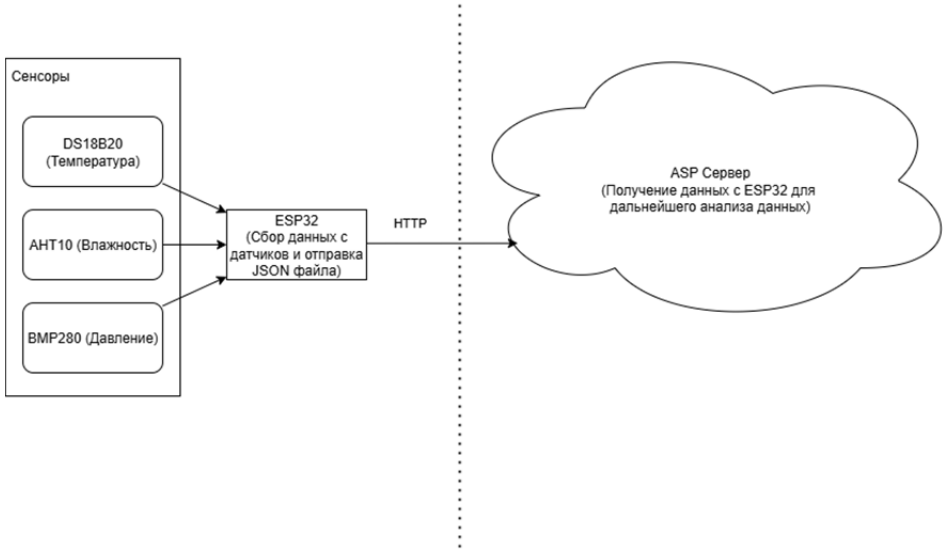


Рис. 1. Архитектура системы для HTTP подключения

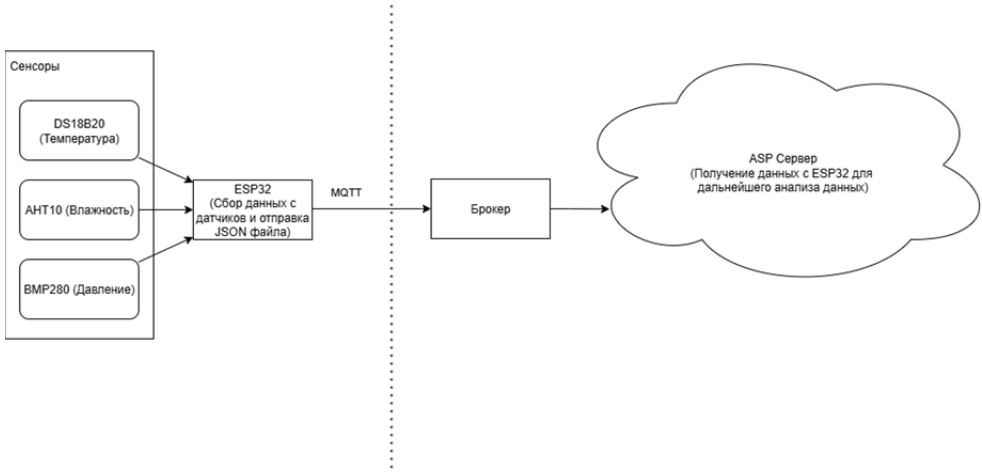


Рис. 2. Архитектура системы для MQTT подключения

Данный стек технологий позволяет обеспечить эффективное управление и мониторинг сообщений. Для повышения точности измерений была реализована система замера времени с микросекундной точностью. Реализация включает последовательный запуск серии тестов по двум протоколам: HTTP и MQTT. Основная цель — измерить задержки передачи и получения данных в реальных условиях, а затем провести их сравнительный анализ.

Описание работы алгоритма анализа протоколов.

1. Запуск и управление тестами: функция startTest(type) запускает тесты по заданному протоколу:

– проверяется наличие WiFi и MQTT соединений;

– сбрасывается статистика;

– устанавливается тип теста (http, mqtt или both);

– активируется режим тестирования.

Текущее состояние и прогресс управляются глобальными переменными в структуре stats.

2. Проведение тестов и учет результатов: в функции handleTesting() запускается соответствующий тестовый запрос (HTTP или MQTT) с контролем количества выполненных тестов (stats.currentTest). При достижении максимума тестов (stats.totalTests, по умолчанию 50) вызывается остановка теста с выводом результатов. В режиме «both» HTTP и MQTT тесты чередуются по очереди.

3. Измерение задержек.

HTTP: задержка вычисляется как время от отправки запроса до получения ответа от сервера. В методе testHttpLatency() формируется JSON-запрос, отправляется POST-запрос, после чего засчитывается время ответа:

```
void testHttpLatency() {
 uint64_t startMicros = getUnixTimeMicros();
 // Формируем JSON и шлем POST
 int httpCode = http.POST(payload);
 if (httpCode == HTTP_CODE_OK) {
 uint64_t endMicros = getUnixTimeMicros();
 float latencyMs = (endMicros – startMicros) / 1000.0;
 updateHttpStats(latencyMs);
 } else {
 stats.httpErrors++;
 }
}
```

MQTT: для MQTT-для измерения latency используется цикл «отправка — получение обратного сообщения». В методе testMqttLatency() отправляется JSON-сообщение в специальный топик, а время ответа засчитывается в колбэке mqttCallback() при получении ответа сервера:

```
void testMqttLatency() {
 uint64_t startMicros = getUnixTimeMicros();
 // Формируем JSON и публикуем
 if (client.publish(topic, payload)) {
 stats.waitingMqttResponse = true;
 stats.mqttSentMicros = startMicros;
 } else {
 stats.mqttErrors++;
 }
}
void mqttCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int
length) {
 if (stats.waitingMqttResponse) {
```

```
 uint64_t endMicros = getUnixTimeMicros();
 updateMqttStats((endMicros – stats.mqttSentMicros) / 1000.0);
 stats.waitingMqttResponse = false;
 }
}
```

4. Обработка результатов: После завершения серии тестов вызывается функция stopTest(), которая выводит основную статистику:

– Среднее, минимальное, максимальное значение задержек;

– Количество ошибок по каждому протоколу;

– Сравнительный анализ средних значений HTTP и MQTT с выводом преимущества одного из протоколов в процентах и миллисекундах.

Данная реализация обладает рядом преимуществ: измерение задержки связи с точностью до микросекунд обеспечивает высокую точность показателей, а использование MQTT, учитывающего полное время от отправки до получения ответа, позволяет выявить реальную задержку обмена. Кроме того, предусмотрена возможность гибко управлять количеством тестов и интервалами через команды Serial, предусмотрен раздельный режим тестирования HTTP, MQTT или их смешанный вариант для объективного сравнения, а также реализован удобный вывод подробной статистики, упрощающий анализ сравнительной эффективности применяемых протоколов.

Для чистоты эксперимента было выполнено 25 тестов для каждого протокола с интервалом в 3 секунды между каждой отправкой, а также три серии повторов для исключения случайных сбоев и большей достоверности полученных результатов. Результаты измерений показали, что среднее время отклика HTTP составило 320,68 мс, а MQTT — лишь 26,03 мс. Минимальные значения также различались в 3,7 раза, максимальные — в 30 раз.

MQTT демонстрирует высокую стабильность, тогда как HTTP подвержен всплескам до 3,5 секунд. Проведенный t-тест статистически подтвердил значимое отличие latency, что свидетельствует о явном преимуществе MQTT в локальной сети. Преимущества MQTT обусловлены постоянным TCP-соединением, малым размером заголовков и асинхронной моделью publish/subscribe. HTTP, несмотря на простоту внедрения, показал более высокие задержки. Данный протокол неэффективен для отправки малых сообщений, что критично для устройств с аккумуляторным питанием [8].

Проведенное сравнение показывает превосходство MQTT над HTTP для IoT-систем мониторинга. Переход на MQTT позволяет сократить задержку доставки данных, увеличить время автономной работы и повысить надежность системы. Эти преимущества делают протокол MQTT подходящим выбором для реализации распределенных систем с ограниченными ресурсами, особенно в условиях нестабильных сетевых соединений и необходимости энергоэффективного обмена данными. Полученные результаты можно применить в проектировании сенсорных сетей, построении метеостанций и разработке устройств для «умного города».

Список источников

[1] *Cisco Annual Internet Report (2018–2023).* White Paper, Cisco Systems, 2020.

[2] Миронов А.Н., Копылова А.В., Фирсов А.О., Ахметшина А.Б. IoT платформа экологического мониторинга. *ИТ-Стандарт*, 2018, т. 1, № 1(14), с. 24–31.

[3] Al-Fuqaha A. et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376.

[4] Fielding R. et al. H*ypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1. RFC 2616. Internet Engineering Task Force*, 1999.

[5] Banks A., Gupta R. *MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard*, 2014.

[6] Курмаев Т.И. Сравнение протоколов передачи данных в интернете вещей. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2022, № 1(115), с. 45–47.

[7] Light R.A. Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol. *Journal of Open Source Software*, 2017, vol. 2, no. 13, art. no. 265.

[8] Naik N. Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *IEEE International Systems Engineering Symposium*, 2017, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088251

Experimental analysis and comparison of data transmission protocols for IoT devices: MQTT and HTTP

Osipov Andrey Alexandrovich **osipovaa@student.bmstu.ru**
Vinokurov Aleksey Alexeyevich **vinokurovaa1@student.bmstu.ru**
Vershinin Evgeny Vladimirovich **vershinin@bmstu.ru**
Ilichev Vladimir Yurievich **ilyichev.vyu@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper presents an experimental comparison of MQTT and HTTP protocol performance for a weather station based on ESP32. The hardware and software architecture, methodology, and test results are described. It is shown that MQTT reduces the average data transmission latency by more than 12 times compared to HTTP, which is essential for energy-efficient environmental monitoring devices. The findings support the protocol selection in IoT projects with strict requirements to telemetry speed and reliability.

Keywords: *IoT, data transfer protocol, weather station, latency, performance*

УДК 004.9

Использование когнитивных алгоритмов при развитии речевых навыков у детей

Ухова Вероника Александровна uva22ki271@student.bmstu.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено применение когнитивных алгоритмов в системах распознавания речи, направленных на развитие речевых навыков у детей. Представлена разработанная экспериментальная программа, реализующая офлайн-распознавание речи с помощью библиотеки Vosk. Показано, что использование интерактивных методов с визуальной обратной связью способствует улучшению артикуляции и слухового контроля. Проведен анализ результатов тестирования, продемонстрировавший повышение точности произношения с 77 до 88 %. Сделаны выводы о целесообразности применения когнитивных алгоритмов в образовательных и логопедических практиках.

Ключевые слова: *распознавание речи, когнитивные алгоритмы, Vosk, детская речь, развитие речи*

Развитие речевых навыков у детей является одной из ключевых задач педагогики, психолингвистики и когнитивной науки. На ранних этапах речевого развития формируются основы коммуникации, мышления и социальной адаптации ребенка, поэтому особое внимание уделяется созданию технологий, способных анализировать и совершенствовать речь.

Современные системы распознавания речи (ASR — Automatic Speech Recognition) позволяют реализовать интерактивные методы обучения и диагностики. Они применяются не только в образовательных платформах, но и в логопедической практике, обеспечивая возможность адаптации к индивидуальным особенностям детского произношения.

Когнитивные алгоритмы, основанные на моделировании процессов восприятия и воспроизведения речи, позволяют обучающим системам подстраиваться под конкретного пользователя.

Таким образом, внедрение когнитивных алгоритмов и нейросетевых технологий в систему речевого обучения представляет собой перспективное направление развития цифровой педагогики и логопедии.

Целью исследования является разработка когнитивных алгоритмов, применяемых при распознавании речи у детей, и анализ их эффективности в процессе формирования речевых навыков.

Материалы и методы исследования. Методологическую основу исследования составляют принципы когнитивной психологии, нейролингвистики и машинного обучения. В работе использовались методы акустического анализа, обработки сигналов и распознавания речи.

В исследовании рассматривались современные открытые программные инструменты:

– Vosk API — офлайн-система распознавания речи с поддержкой русского языка [1];

– Mozilla DeepSpeech — система, реализующая архитектуру рекуррентных нейронных сетей (RNN) [2];

– Kaldi — исследовательский фреймворк для обучения акустических и языковых моделей [3];

– SpeechRecognition — библиотека Python для интеграции речевых интерфейсов.

Из рассмотренных программных инструментов для реализации экспериментальной части описываемого проекта была выбрана наиболее распространенная среда программирования Python и библиотека Vosk, прекрасно зарекомендовавшая себя для офлайн-распознавания речи на русском языке. Для визуализации и взаимодействия с пользователем применялась библиотека Tkinter. Это позволило объединить когнитивные принципы распознавания речи с интерактивными методами обучения.

В рамках исследования была разработана экспериментальная обучающая программа для развития речи у детей младшего школьного возраста.

Приложение выводит на экран короткие фразы, которые ребенок должен повторить. Система, использующая библиотеку Vosk, анализирует произнесенный ответ и определяла процент совпадения с эталоном. После распознавания речи вычисляется процент совпадения между эталонной и произнесенной фразой с помощью алгоритма SequenceMatcher библиотеки difflib. Для настройки микрофона используются команды библиотеки PyAudio.

В зависимости от точности совпадения произнесенной ребенком фразы тестовой индикатор окрашивается в зеленый, желтый или красный цвет, что обеспечивает наглядную обратную связь. При необходимости система выделяет проблемные слова и предлагает повторение, что помогает ребенку самостоятельно корректировать ошибки.

Ключевой фрагмент программы, вычисляющий точность произношения (процент совпадения распознанной произнесенной фразы с тестовым текстом), приведен ниже:

```
similarity = difflib.SequenceMatcher(None, spoken_text,
                                                target_phrase).ratio()
percent = similarity * 100
```

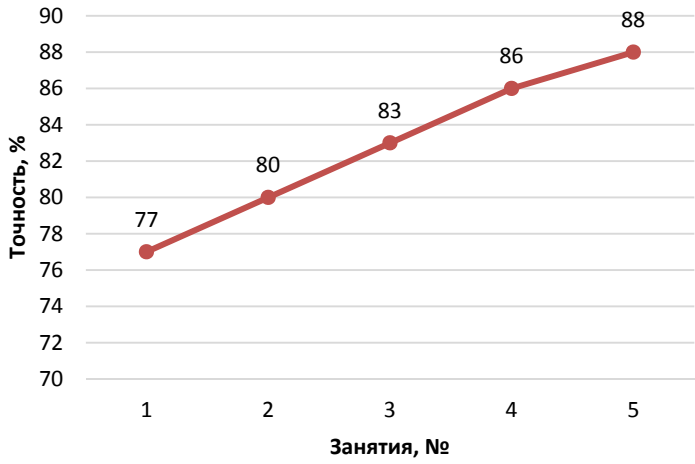
Результат отображается в виде цветовой шкалы и сопровождается советами по улучшению произношения. При необходимости система выделяла проблемные звуки и предлагала повторение.

Такой интерактивный формат соответствует когнитивным принципам обратной связи и способствует формированию у ребенка навыков самоконтроля и коррекции речи.

Результаты исследования и их анализ. Тестирование созданной системы проводилось с 10 детьми возраста 6–8 лет. Всего было проведено 5 занятий. Каждый ребенок должен был повторить 30 тестовых фраз.

Во время тестирования было зафиксировано постепенное повышение качества произношения.

Для наглядной визуализации динамики улучшения речи был построен график (см. рисунок), отражающий изменение средней точности произношения в зависимости от количества занятий.



Динамика повышения точности произношения у детей после внедрения обучающей программы

Из графика видно, что уже к пятому занятию средний показатель правильного произношения увеличился с 77 до 88 %. Это подтверждает практическую эффективность использования когнитивных алгоритмов.

Регулярное взаимодействие с системой способствует выработке устойчивых навыков артикуляции, улучшению слухового контроля и развитию саморегуляции речи.

Анализ ошибок показал следующую их структуру: замены звуков — 44 %; пропуски фонем — 39 %; полное искажение слов — 17 %.

Сопоставление полученных данных с результатами исследований ВШЭ и СПбГУ подтвердило, что дети наиболее часто испытывают трудности при произнесении акустически близких согласных и при контроле ритмико-интонационной структуры речи [4, 5].

Кроме того, отмечено, что интерактивная форма взаимодействия повышает мотивацию и вовлеченность ребенка, что делает когнитивные алгоритмы эффективным инструментом для обучения и логопедической коррекции.

Заключение. Применение когнитивных алгоритмов при развитии речевых навыков у детей способствует повышению эффективности речевого обучения и формированию устойчивых навыков артикуляции. Интерактивные

системы с элементами распознавания речи обеспечивают адаптацию под индивидуальные особенности ребенка и позволяют получать обратную связь в режиме реального времени. Включение подобных технологий в образовательные и логопедические практики открывает новые возможности для диагностики, мониторинга и коррекции речевого развития. Дальнейшие исследования целесообразно направить на создание мультимодальных когнитивных систем, объединяющих распознавание речи, анализ мимики и эмоциональных характеристик голоса, что позволит повысить точность оценки речевых навыков у детей.

Список источников

[1] *VOSK Offline Speech Recognition API.* URL: https://alphacephei.com/vosk/ (accessed 07.10.2025).

[2] *Mozilla DeepSpeech Project.* URL: https://deepspeech.readthedocs.io/ (accessed 10.10.2025).

[3] *Kaldi Speech Recognition Toolkit.* URL: https://kaldi-asr.org/ (accessed 12.10.2025).

[4] *Проект CHILDES-RU.* URL: https://www.hse.ru/neuroling/cla_project_childes (дата обращения 08.10.2025).

[5] *INFANT-RU Child Speech Corpus.* URL: https://pureportal.spbu.ru/en/publications/---infantru-childru-emochildru----------%28a42fad9b-9376-45ca-9ff2-3e7180852a7c%29.html?utm_source=chatgpt.com (accessed 11.10.2025).

The use of cognitive algorithms in the development of speech skills in children

Ukhova Veronika Alexandrovna uva22ki271@student.bmstu.ru
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yuryevich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The application of cognitive algorithms in speech recognition systems aimed at developing speech skills in children is considered. A developed experimental program is presented that implements offline speech recognition using the Vosk library. The use of interactive methods with visual feedback has been shown to improve articulation and auditory control. An analysis of the test results was carried out, which demonstrated an increase in pronunciation accuracy from 77 % to 88 %. Conclusions were drawn on the advisability of using cognitive algorithms in educational and speech therapy practices.

Keywords: *speech recognition, cognitive algorithms, Vosk, children's speech, speech development*

УДК 004.049

Разработка и анализ функциональных характеристик интегрированной системы менеджмента небольшого бизнеса с использованием телеграм-бота

Караянов Тимофей Андреевич karayanovta@student.bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено современное состояние рынка систем автоматизации для малого бизнеса в сфере услуг. Представлена разработка интегрированной системы менеджмента на базе Telegram-бота с использованием Python и MySQL. Показано, что решение обладает преимуществами перед коммерческими аналогами по стоимости, простоте внедрения и потреблению ресурсов. Сделан вывод, что система может успешно применяться для автоматизации записи клиентов, учета расписания и управления клиентской базой микро-бизнеса и индивидуальных предпринимателей.

Ключевые слова: *телеграм-бот, система менеджмента, запись клиентов, учет расписания, база данных, язык Python, бизнес решение*

Введение. Современную экономику невозможно представить без многочисленных IT решений, которые помогают бизнесу развиваться, в том числе за счтт автоматизации процессов менеджмента. Запись клиента и учет расписания являются ключевыми задачами менеджеров и администраторов в сфере услуг, но даже наличие высококвалифицированных специалистов не исключает человеческих ошибок.

На рынке присутствует дефицит готовых и недорогих решений «из коробки», способных выполнять необходимый минимум задач без дополнительной настройки или углубленного изучения программы. В ответ на данную потребность рынка, было принято решение разработать IT-решение, подходящее для начинающих мастеров и небольших бизнесов, а именно интегрированную систему менеджмента с использованием Telegram.

Таким образом, целью работы является обоснование разработки собственного программного продукта с использованием Telegram-бота, его реализация и последующий анализ характеристик на соответствие запросам целевой аудитории.

Основная часть. В данной работе в качестве главных показателей для выбора технологий и ПО используются следующие факторы: стоимость программного продукта, интуитивность обращения с системой, прозрачность лицензионной модели и отсутствие ограничений на его использование в стране.

Для решения подобного рода проблем на рынке существуют различные коммерческие CRM (AMO CRM, Bitrix24) и ERP системы (1C, Microsoft Dynamics 365) и готовые SaaS сервисы (Dikidi.ru, YClients.com). Однако они мало подходят для небольших бизнесов в сфере услуг из-за своей дороговиз-

ны и сложности настройки. Поэтому разработка Telegram-бота для автоматизации бизнеса представляет собой решение для удовлетворения потребностей малого и среднего бизнеса в виде доступного и эффективного инструмента управления клиентскими взаимодействиями [1].

Технологического стек проекта разработан, исходя из требований к надежности и масштабируемости. Для программирования выбран язык Python благодаря наличию богатой экосистемы библиотек для работы с Telegram API, для работы с базой данных выбран MySQL, гарантирующий стабильное хранение структурированных данных клиентов.

Такой подход позволяет создать сбалансированную систему, сочетающее производительность, минимальные эксплуатационные расходы и возможность дальнейшего развития функционала [2].

Реализация интегрированной системы менеджмента с использованием телеграм-бота состоит из следующих этапов: исследование предметной области, определение функционала разрабатываемой системы, проектирование базы данных, реализация логики бота с учетом интеграции БД, тестирование системы для анализа функциональных характеристик. Целевая аудитория разрабатываемой системы — небольшой бизнес, индивидуальные мастера. Потребности данной сферы малого бизнеса заключаются в низкой стоимости, простоте внедрения, стабильности решения, доступности платформы.

Для реализации БД для бота необходимо создание 7 сущностей: Clients, Services, Masters, Schedule_slots, Appointments, Master_services, Audit_Log.

Решение предполагает клиент-сервисную архитектуру, где в качестве клиента выступает Telegram, отправляющий запросы напрямую на Ubuntu сервер бота через интеграцию с библиотекой pyTelegramBotAPI. Архитектура системы представлена на рис. 1.

Система работает как умный помощник для записи через Telegram. Когда пользователь нажимает «Записаться», бот переходит в режим диалога и просит прислать данные в четыре строки: имя, телефон, желаемые дату-время и услугу. Также возможна запись из диалогового окна с услугами, в таком случае услуга будет отмечена согласно выбору пользователя.

Получив информацию, система сначала проверяет, есть ли такой клиент в базе. Затем ищет свободные окна в расписании мастеров, предлагая выбор мастеров, доступных слотов. Система создает запись в базе данных и помечает время как занятое. После успешного бронирования пользователь получает подтверждение записи, а администратору приходит уведомление [3].

Система не позволит забронировать уже занятое время, а эргономичный интерфейс бота облегчает процесс записи даже для неподготовленных пользователей.

Бот, написанный на Python, принимает запросы от пользователя и используя шаблоны, отправляет запросы в базу данных MySQL.

Результаты тестирования и анализа функциональных характеристик. Результаты тестирования подтвердили полное соответствие разработанного решения потребностям целевой аудитории. Telegram-бот успешно решает клю-

чевые проблемы малого бизнеса в сфере управления клиентами, предлагая экономичную альтернативу существующим коммерческим системам.

Важнейшим преимуществом стала легковесность архитектуры — система стабильно работает даже на маломощном оборудовании, потребляя менее 2048 МБ оперативной памяти и менее 5 ГБ дискового пространства, что подтверждается практическими испытаниями [4].

На рис. 2 изображено потребление ресурсов разработанной системы при реальном использовании.

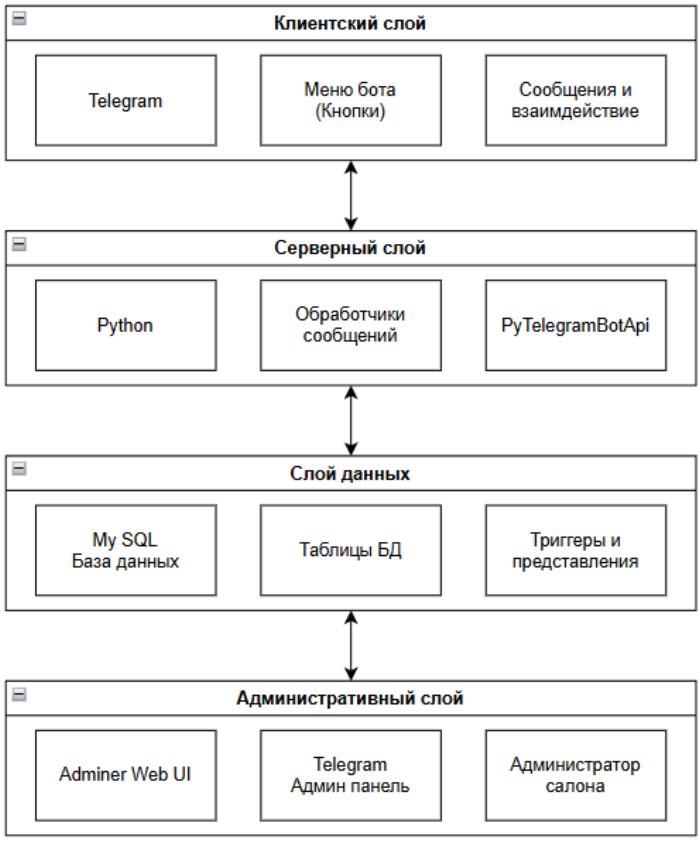


Рис. 1. Архитектура системы телеграм бота

```
top - 17:27:45 up 24 min,  1 user,  load average: 0.16, 0.11, 0.07
Tasks: 100 total,   1 running,  98 sleeping,   1 stopped,   0 zombie
%Cpu(s):  0.1 us,  0.2 sy,  0.0 ni, 99.7 id,  0.0 wa,  0.0 hi,  0.0 si,  0.0 st
MiB Mem :   7903.2 total,   6070.1 free,   1432.6 used,    569.8 buff/cache
MiB Swap:   2048.0 total,   2048.0 free,      0.0 used.   6470.6 avail Mem
```

Рис. 2. Скриншот монитора ресурсов сервера системы

По показателю стоимости решение обладает принципиальным преимуществом перед анализируемыми коммерческими системами — сравнительно низкая стоимость абонентской платы (почти на 70 % ниже) за счет малой потребности к оборудованию и отсутствия необходимости в дорогостоящем внедрении и обучении.

Интеграция с Telegram обеспечила нулевой порог входа для пользователей. Также система демонстрирует отсутствие ограничений на использование в стране, а размещение инфраструктуры на территории РФ гарантирует бесперебойную работу сервиса.

Перспективы развития системы видятся в добавлении модуля аналитики без изменения базовой легковесной архитектуры, что сохранит ключевые преимущества решения [5].

Ключевым достижением работы стало создание сбалансированного продукта, который обеспечивает сокращение времени внедрения до 2 часов, нулевой порог входа за счет интеграции с Telegram, стабильную работу при минимальных аппаратных требованиях, прозрачную лицензионную модель без скрытых платежей, полное соответствие требованиям локализации технологий в современных условиях [6].

Список источников

[1] Козориз А.В. Проблема персонализации в маркетинговых решениях современных компаний: роль чат-ботов. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, 2019, т. 9, № 10-1, с. 649–656. https://doi.org/10.34670/ar.2020.91.10.073

[2] Мизюков Г.С. Разработка системного программного обеспечения на основе чат-бота ChatGPT. *Вестник компьютерных и информационных технологий*, 2024, т. 21, № 4(238), с. 57–64. https://doi.org/10.14489/vkit.2024.04.pp.057-064

[3] Ермаков О.А., Брозгунова Н.П. Python — как инструмент для анализа данных. *Наука и образование*, 2020, т. 3, № 4, с. 26.

[4] Ураев Д.А. Метрики для оценки качества чат-бот приложений. *Наука, техника и образование*, 2019, № 9(62), с. 36–40.

[5] Шлыков А.А., Антипкин А.С. Сравнительный анализ способов защиты информации в автоматизированных системах с использованием системы управления базами данных PostgreSQL. *Инжиниринг и технологии*, 2024, т. 9, № 2, с. 1–3. https://doi.org/10.21685/2587-7704-2024-9-2-1

[6] Гридин В.Н., Анисимов В.И., Васильев С.А. Методы повышения производительности современных вебприложений. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2020, № 2(212), с. 193–200. https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-193-200

Development and analysis of functional characteristics of the integrated management system of a small business using a telegram bot

Karayanov Timofey Andreevich karayanovta@student.bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The current state of the market for automation systems for small businesses in the service sector is considered. The development of an integrated management system based on a Telegram bot using Python and MySQL is presented. It is shown that the solution has advantages over commercial counterparts in terms of cost, ease of implementation and resource consumption. It was concluded that the system can be successfully used to automate customer recording, schedule accounting and manage the customer base of microbusinesses and individual entrepreneurs.

Keywords: *telegram bot, management system, customer record, schedule accounting, database, Python language, business solution*

УДК 004.827

Повышение качества результатов поиска научно-технической информации в книжном фонде за счет применения технологий ИИ и метода RAG

Винокуров Алексей Алексеевич vinokurovaa1@student.bmstu.ru
Осипов Андрей Александрович osipovaa@student.bmstu.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследована проблема низкой эффективности традиционного поиска научно-технической информации в условиях растущих объемов данных. Рассмотрена технология RAG как решение для повышения качества семантического поиска через объединение векторных представлений текста с генерацией ответов. Проведен сравнительный анализ RAG-подхода с классическими методами поиска по метаданным на корпусе из 100 искусственно сгенерированных научно-технических книг. Экспериментально оценены различные способы индексирования с применением векторных эмбеддингов. Результаты демонстрируют значительное повышение точности поиска и снижение количества нерелевантных результатов при использовании RAG-архитектуры. Выводы применимы для модернизации библиотечных каталогов и систем управления научно-технической документацией.

Ключевые слова: *RAG, семантический поиск, информационный поиск, векторные базы данных, библиотечные системы*

Библиотечные системы показывают низкое качество поиска из-за ограничений традиционных методов точного соответствия ключевых слов. Пользователи вынуждены угадывать терминологию каталогов, что приводит к потере ценных источников информации [1, 2]. Технология RAG объединяет семантический поиск с генерацией ответов через языковые модели и внешние базы знаний. Система сначала находит релевантные документы векторным поиском, ранжирует информацию, затем формирует ответ с учетом контекста запроса. Это позволяет понимать сложные формулировки независимо от терминологии пользователя [3].

Цель исследования — определить степень повышения качества поиска научно-технической информации при использовании RAG по сравнению с традиционными реляционными подходами.

Сформирован корпус из 100 искусственно сгенерированных научно-технических книг с полными метаданными для обеспечения объективности тестирования. Текстовое содержание сегментировано на фрагменты по 1000 токенов с перекрытием 100 токенов. Векторные представления созданы через модель cointegrated/rubert-tiny2 с размерностью эмбеддингов 312 [4]. Использовалась векторная СУБД Qdrant с метрикой косинусной схожести. Настрой-

ки системы включали возврат 5 наиболее релевантных результатов с порогом релевантности 0.5. Результаты ранжировались по убыванию косинусной схожести между запросом и индексированными фрагментами [5]. Качество поискового процесса измерялось четырьмя стандартными метриками: Precision@k показывает долю релевантных документов в топ-k результатах, Recall@k отражает полноту обнаружения значимых результатов, NDCG@k учитывает позицию результатов в ранжировании с приоритетом верхних позиций, MRR измеряет скорость нахождения первого релевантного ответа [6]. Тестирование проводилось на 30 разнообразных поисковых запросах.

Все метрики усреднялись по 30 тестовым запросам для получения агрегированной оценки качества системы. По результатам обработки данных эксперимента, авторами внесены данные в таблицу.

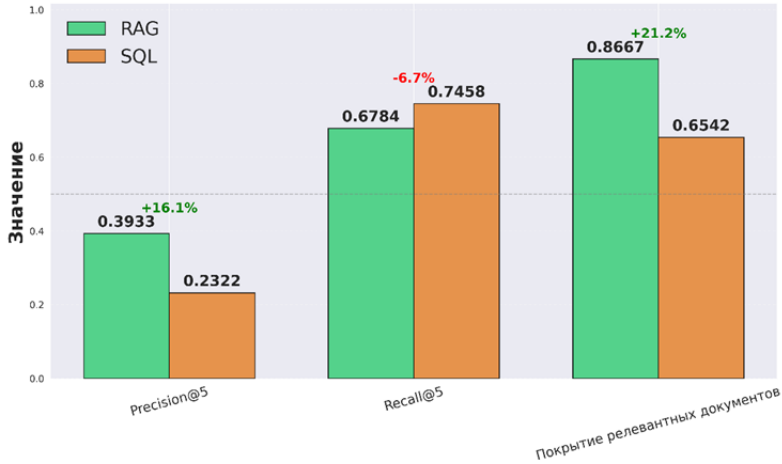
Метрики, собранные в результате эксперимента

Метрика	RAG	SQL	Разница
Precision@5	0,3933	0,2322	+0,1611 (+69,4 %)
Recall@5	0,6784	0,7458	–0,0674 (–9,0 %)
NDCG@5	0,6518	–	–
MRR	0,6983	–	–
Hit Rate@5	0,8667	–	–
Общее покрытие	–	0,6542	–

RAG-система продемонстрировала превосходство по точности поиска с показателем Precision@5 = 0,3933 против 0,2322 у SQL-подхода. Пользователи получают почти вдвое меньше нерелевантных результатов в первой пятерке выдачи. По полноте показатели сопоставимы: RAG обеспечивает Recall@5 = 0,6784, тогда как SQL достигает 0,7458, однако высокая полнота SQL достигается ценой низкой точности [7]. На рисунке приведен построенный авторами график сравнения ключевых метрик RAG- и SQL-поиска, иллюстрирующее их различия по точности, полноте и общему покрытию релевантных документов.

RAG превосходит SQL по двум ключевым метрикам: точность выше на 16 %, покрытие релевантных документов больше на 21,2 %. Незначительное отставание наблюдается только по метрике полноты на 6,7 %. SQL-система демонстрирует низкую F1-меру из-за большого количества нерелевантных результатов при высокой полноте.

RAG показал значительные преимущества в пользовательском опыте через высокое качество ранжирования NDCG@5 = 0,6518, при котором наиболее релевантные результаты стабильно занимают верхние позиции. Показатель MRR = 0,6983 означает появление первого релевантного результата в среднем на второй позиции выдачи. Hit Rate@5 = 0,8667 гарантирует обнаружение релевантных документов в топ-5 результатов [7].



Сравнение ключевых метрик RAG- и SQL-систем

Семантический поиск RAG устойчив к вариациям формулировок, синонимам и перефразированиям без необходимости точного лексического совпадения. SQL-поиск ограничен строгим текстовым матчингом и не улавливает концептуальное сходство, что снижает надежность при изменении терминологии пользователей. RAG-архитектура обеспечивает качественное превосходство для семантического поиска в библиотечных системах, минимизирует информационный шум и гарантирует стабильное получение релевантных результатов. Технология представляет собой оптимальное решение для модернизации библиотечных каталогов и систем управления научно-технической документацией.

Список источников

[1] Стукалова А.А. *Функциональность электронного каталога: требования российских и зарубежных пользователей.* Новосибирск, ГПНТБ СО РАН, 2025.

[2] Авдеева Н.В., Никулина О.В., Хританков А.С., Чехович Ю.В. Научный поиск: методы тематически-ориентированного поиска научной информации. *RCDL-2014. XVI Всерос. науч. конф.: матер.* Москва, ЗАО «Анти-Плагиат», 2014.

[3] *RAG: учим искусственный интеллект работать с новыми данными*. URL: https://yandex.cloud/ru/blog/posts/2025/05/retrieval-augmented-generation-basics (дата обращения 07.10.2025).

[4] Рейтинг русскоязычных энкодеров предложений. URL: https://habr.com/ru/articles/669674/ (дата обращения 07.10.2025).

[5] *Все про Qdrant. Обзор векторной базы данных*. URL: https://habr.com/ru/companies/amvera/articles/925206/ (дата обращения 07.10.2025).

[6] *Qdrant Similarity search*. URL: https://qdrant.tech/documentation/concepts/search/ (accessed 08.10.2025).

[7] *Тестирование качества работы RAG. Описание и сравнение метрик*. URL: https://habr.com/ru/articles/951222/ (дата обращения 08.10.2025).

Improving the quality of scientific and technical information search results in book collections through the application of AI Technologies and the RAG Method

Vinokurov Alexey Alexeyevich vinokurovaa1@student.bmstu.ru
Osipov Andrey Alexandrovich osipovaa@student.bmstu.ru
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of low efficiency in traditional scientific and technical information retrieval under growing data volumes was examined. The RAG technology was considered as a solution to improve the quality of semantic search by combining text vector representations with answer generation. A comparative analysis of the RAG approach and classical metadata-based methods was conducted using a corpus of 100 artificially generated scientific and technical books. Various indexing methods utilizing vector embeddings were experimentally evaluated. The results demonstrate a significant increase in search accuracy and a reduction in the number of irrelevant results when using RAG architecture. The findings are applicable to the modernization of library catalogs and scientific and technical documentation management systems.

Keywords: *RAG, semantic search, information retrieval, vector databases, library systems*

УДК 004.42

Разработка системы баллистического моделирования на языке C++ с применением многопоточных вычислений

Голубев Максим Сергеевич golubevms@student.bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследована проблема низкой эффективности и гибкости существующих решений для баллистических расчетов в условиях требований высокой точности, гибкости и производительности. Библиотеки Python не обеспечивают широкого функционала. Поэтому разработана архитектура на основе C++ с многопоточной обработкой как решение для повышения скорости вычислений параметров траектории. Проведен сравнительный анализ многопоточного подхода с классическими последовательными методами на тестовом наборе из 8 различных сценариев работы (начальных условий). Экспериментально оценены различные способы распараллеливания вычислений с применением современных стандартов C++17/20. Опробовано использование многопоточности в данных вычислениях. Выводы применимы для создания образовательных, инженерных и научных систем баллистического моделирования.

Ключевые слова: *баллистическое моделирование, многопоточные вычисления, C++, физическое моделирование, траектория полета*

Современные библиотеки для выполнения баллистических расчетов, широко используемые специалистами (например, библиотека ballistics для языка программирования Python [1]), имеют серьезные ограничения, препятствующие эффективному решению задач обработки больших объемов данных. Эти ограничения связаны с недостаточной гибкостью используемых алгоритмов, заложенных разработчиками библиотек.

Ключевое ограничение заключается в производительности и масштабируемости указанных решений. Современные методы анализа траекторий летательных аппаратов требуют быстрого взаимодействия и мгновенного отклика от вычислительных инструментов. Однако современные инструменты зачастую построены таким образом, что пользователю приходится ожидать окончания длительных процессов расчета перед получением результатов. Это существенно замедляет процесс интерактивного моделирования, снижает эффективность работы специалиста и препятствует выполнению быстрых итераций анализа, необходимых в реальных условиях проектирования ракетных комплексов или прогнозировании движения космических объектов.

Таким образом, низкая производительность существующих инструментов становится значительным препятствием для решения актуальных задач современного ракетостроения и космической отрасли, особенно в ситуациях,

когда необходимо оперативно обрабатывать большие объемы экспериментальных данных, создавать точные модели полета и быстро анализировать полученные результаты.

Исходя из этого, целью исследования явилось определение степени повышения гибкости и производительности баллистических расчетов при использовании многопоточных подходов на C++ [2] по сравнению с традиционными последовательными методами.

Для организации исследований вначале был определен набор параметров баллистики:

– начальная скорость;
– начальное ускорение;
– угол броска;
– дальность броска;
– высота броска;
– время полета;
– время подъема;
– время падения.

Затем, с помощью языка программирования C++, создана программа, вычисляющая весь набор перечисленных параметров, исходя из нескольких заданных известных параметров (при условии, что это вообще возможно). Алгоритм программы состоит из следующих блоков:

– для каждого параметра создана своя функция, объединяющая различные способы вычисления данного параметра через другие. В случае неудачи такая функция показывает, что это сделать не удалось (вернет константу «UNITIALISED_VARIABLE»);

– производится анализ, какие параметры известны (реализовано с помощью вектора bool и пометки его элементов перед циклом вычисления и в конце очередной итерации);

– реализуется цикл вычислений неизвестных параметров, завершающийся записью результата и корректировки вектора bool.

– задается условие выхода. Для этого анализируется количество подсчитанных параметров. Если это количество равно нулю (то есть количество известных параметров в конце текущей итерации равно количеству известных параметров на предыдущей итерации), то значит, и в дальнейших итерациях ситуация повторится (нет новых данных). Поэтому в таком случае система нерешаема. Если же количество подсчитанных на итерации параметров равняется общему количеству параметров, то расчет окончен (иначе цикл расчета повторяется).

В ходе исследований были опробовано использование многопоточности для проверки гипотезы повышения производительности (с помощью std::async и std::future[3]).

Основная идея заключалась в том, чтобы каждому потоку передать вычисление определенного параметра. Тестирование программы проводилось с помощью 8 заранее заготовленных тестов, состоящих из исходных данных

и ожидаемого ответа. При тестировании подсчитывалось суммарное время выполнения всех 8 тестов. Результаты сравнения отображены в таблице.

Сравнение времени, необходимого для выполнения тестов

Метод вычислений	Время на выполнение 8 тестов
Однопоточный	68us 600ns
Двухпоточный	1ms 153us 900ns
Многопоточный	1ms 109us 600ns

Анализ результатов тестирования показывает, что ввиду достаточно длительного времени создания каждого потока и небольших задачах, которые он будет решать — эта гипотеза не оправдалась. Такая ситуация возникает даже несмотря на то, что каждому потоку была предоставлена своя копия.

Таким образом, в процессе исследований создан алгоритм для гибкого подсчета параметров баллистики и основанная на нем программа на языке программирования C++. Исследована гипотеза использования многопоточности для повышения производительности вычислений [4]. В будущем созданная программа может быть усовершенствована для более серьезных вычислений в сфере баллистики.

Список источников

[1] *Ballistics 0.4.0 documentation.* URL: https://python-ballistics.readthedocs.io/en/latest/ (accessed 22.10.2025).

[2] *Boost C++ Libraries.* URL: https://www.boost.org/doc/libs/latest/doc/html/thread/compliance.html#thread.compliance.cxx1y.executors (accessed 22.10.2025).

[3] *Async and ~future (Revision 4).* URL: https://isocpp.org/files/papers/N3773.pdf (accessed 22.10.2025).

[4] *std::async cppreference.com.* URL: https://en.cppreference.com/w/cpp/thread/async.html (accessed 22.10.2025).

Development of a ballistic modeling system in C++ using multithreaded computing

Golubev Maxim Sergeevich golubevms@student.bmstu.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of low efficiency and flexibility of existing solutions for ballistic calculations in conditions of requirements of high accuracy, flexibility and performance has been investigated. Python libraries do not provide a wide functionality. Therefore, a C++-based architecture with multithreading processing was considered as a solution to increase the speed of trajectory parameters calculations. A comparative analysis of the multithreading approach with classical sequential methods was carried out on a test set of 8 different sce-

narios of operation (initial conditions). Various ways of parallelization of calculations with application of modern C++17/20 standards were experimentally evaluated. Unfortunately, due to the high cost of creating streams and the low load on each stream, the idea did not pay off. The findings are applicable to the creation of educational, engineering, and scientific ballistic modeling systems.

Keywords: *ballistic modeling, multithreaded computing, C++, physical modeling, flight trajectory*

УДК 004.42

Разработка микросервиса мониторинга IoT-датчиков электросети

Крысин Иван Александрович ivan@bmstu.ru
Бровкина Алиса Вадимовна brovkinaav@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

В современном мире системы электроснабжения являются неотъемлемой частью инфраструктуры и требуют постоянного контроля и оптимизации. С развитием технологий интернета вещей (IoT) стало возможным собирать и анализировать данные о состоянии энергетических сетей в реальном времени. Это позволяет не только своевременно выявлять неисправности, но и прогнозировать нагрузку с помощью систем AI-аналитики. Такой интеллектуальный подход позволяет перейти от реагирования на аварии к их предотвращению, значительно повышая надежность, устойчивость и экономическую эффективность всей системы энергоснабжения в условиях растущих нагрузок и интеграции возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: *микросервис, IoT-датчики, мониторинг, сети энергоснабжения, электросеть, сбор данных, REST API, Message Broker*

Главная цель работы — разработка микросервиса, который позволит в режиме реального времени собирать, передавать, обрабатывать и анализировать данные с множества распределенных IoT-датчиков, установленных в электросети, а также визуализировать эти данные для пользователей в реальном времени.

Это позволит оперативно выявлять аномалии, прогнозировать нагрузку и предотвращать сбои, тем самым повышая эффективность управления сетью и качество предоставляемых потребителям услуг.

Система может использоваться для мониторинга энергопотребления жилых комплексов, административных зданий, производственных предприятий и других объектов, где важно контролировать расход электроэнергии и работу энергетического оборудования [1].

Основная значимость данной работы заключается в создании масштабируемого и отказоустойчивого решения для мониторинга критической инфраструктуры. Система предназначена для работы в режиме реального времени, что позволит оперативно реагировать на возможные проблемы, такие как перегрузки, колебания напряжения и температуры оборудования. Результатом работы будет прототип микросервиса, который обеспечит надежный сбор и предоставление телеметрической информации для последующего анализа и интеграции с геоинформационными и другими управляющими системами.

В результате внедрения системы планируется повышение прозрачности и эффективности управления энергопотреблением, сокращение времени на выявление неисправностей, ускорение принятия решений и оптимизация эксплуатационных процессов.

Таким образом, проект направлен на улучшение контроля энергоресурсов и повышение энергоэффективности объектов.

Одной из ключевых задач, решаемых подобными системами, является обеспечение высокой доступности и минимальной задержки при обработке потоковых данных с датчиков, включая данные о напряжении, силе тока, температуре трансформаторов, состоянии коммутационных аппаратов и т. д. Важно отметить, что такие системы являются основой для построения «цифровых двойников» и систем предиктивной аналитики в энергетике [2].

Также в разрабатываемой системе будет предусмотрена привязка датчиков к реальным объектам на карте. Привязка датчиков к объектам на карте создает целостную систему мониторинга, преобразующую разрозненные данные в пространственную аналитику. Данная функция обеспечивает точную локализацию оборудования и технологических процессов на цифровой карте территории. Такой подход позволяет оперативному персоналу мгновенно идентифицировать местоположение контролируемых объектов и соотносить показания датчиков с конкретными активами предприятия [3].

Визуальное отображение данных на карте упрощает анализ распределенных систем — от отслеживания перемещения транспортных средств до мониторинга состояния стационарного оборудования. Пространственная привязка позволяет выявлять географические закономерности, оптимизировать маршруты и распределение ресурсов. При возникновении аварийных ситуаций система обеспечивает быстрое обнаружение проблемы и точное определение ее местоположения [4].

Интеграция данных датчиков с картографической основой формирует единое информационное пространство для принятия управленческих решений. Это повышает эффективность эксплуатации инфраструктуры, сокращает время реагирования на инциденты и создает основу для предиктивного анализа оборудования. Алгоритм привязки представлен на рисунке.

В разрабатываемой системе микросервис мониторинга отвечает за следующие функции:

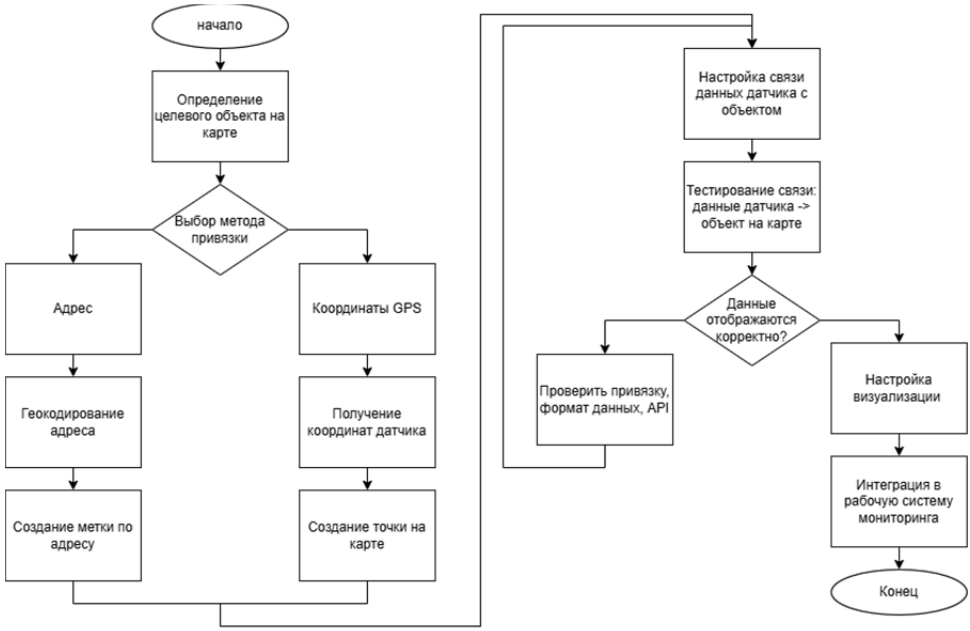
– прием данных: обеспечивает API-эндпоинты для приема телеметрии от шлюзов, агрегирующих данные с непосредственно подключенных датчиков [5];

– валидация данных: проверяет входящие данные на соответствие ожидаемым форматам и диапазонам значений;

– обработка и обогащение данных: может добавлять к данным мета-информацию (например, географические координаты датчика, полученные из базы данных);

– временное хранение и передача: сохраняет данные в базу данных и/или перенаправляет их через брокер сообщений другим заинтересованным микросервисам (например, для анализа аномалий или визуализации в GIS);

– привязка датчика: привязывает датчик к объекту для его отображения на 2D-карте.



Алгоритм привязки датчика к объекту на карте

Список источников

[1] Лаврухин А.А. Применение технологий IIoT в автоматизированной информационной системе мониторинга и учета энергоресурсов. *инамика систем, механизмов и машин,* 2019, т 7, № 2.

[2] Абрамов В.И., Гордеев В.В., Столяров А.Д. Цифровые двойники: характеристики, типология, практика развития. *Вопросы инновационной экономики*, 2024, № 3, с. 693–711.

[3] Моравель В.И., Борисов В.А. *Возможности использования цифровых двойников в задачах электроэнергетики.* URL: https://web.snauka.ru/issues/2022/06/98404 (дата обращения 24.10.2025).

[4] Газе Д.Д. Развитие технологии «цифровой двойник» в энергетике. *Достижения вузовской науки. XI Междунар. науч.-исслед. конкурс: сб. тр*. Пенза, Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019, с. 114–116.

[5] Хлупнов М. *Использование машинного обучения в IoT-шлюзах: архитектура и сценарии.* URL: https://controleng.ru/internet-veshhej/ml-iot (дата обращения 24.10.2025).

Development of a microservice for monitoring IoT sensors of the power grid

Ivan Alexandrovich Krysin
Krysin Ivan Alexandrovich ivan@bmstu.ru
Brovkina Alice Vadimovna brovkinaav@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

In today's world, power supply systems are an integral part of infrastructure and require constant monitoring and optimization. With the advancement of Internet of Things (IoT) technologies, it has become possible to collect and analyze real-time data on the state of power networks. This not only allows for timely detection of faults but also enables the prediction of load patterns using AI-based analytics systems. This intelligent approach enables a shift from reactive to proactive response to power system failures, significantly improving the reliability, resilience, and cost-effectiveness of the entire power supply system in the face of increasing loads and the integration of renewable energy sources.

Keywords: *microservice, IoT sensors, monitoring, power supply networks, power grid, data collection, REST API, Message Broker*

УДК 004.72

Разработка автоматизированной платформы для научных конференций

Евтеев Артем Сергеевич evteevas@student.bmstu.ru
Ванаков Сергей Владимирович vanakovsv@student.bmstu.ru
Борсук Наталья Александровна borsuk@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема низкой эффективности традиционных методов организации научных конференций в МГТУ им. Н.Э. Баумана, основанных на ручной обработке данных. Обоснована необходимость создания веб-платформы для автоматизации процессов. Представлено решение на основе модульной архитектуры с использованием Nuxt 3 и Laravel. Ключевая особенность — шаблонный подход, позволяющий управлять структурой и контентом множества конференций через единую CMS без участия разработчиков. Описаны архитектура, технологии, реализованный функционал и преимущества внедрения: централизация данных, снижение затрат и масштабируемость. Определены направления дальнейшего развития системы.

Ключевые слова: *веб-приложение, научная конференция, автоматизация, CMS, шаблонизация, Nuxt, Laravel, REST API, Docker, университет, мультитенантность*

Организация научных конференций в МГТУ им. Н. Э. Баумана — сложный процесс с участием множества ролей. Этапы от приема заявок и рецензирования до формирования программы и публикации итогов требуют обработки больших объемов структурированных данных. Традиционные методы (почта, таблицы, ручные операции) трудоемки, уязвимы к ошибкам, усложняют контроль версий и снижают прозрачность процессов [1]. В условиях цифровой трансформации необходимы универсальные веб-инструменты, автоматизирующие ключевые операции и задающие единый стандарт проведения мероприятий. Коммерческие решения часто избыточны, дороги и плохо учитывают специфику вузовской среды.

Цель работы. Повышение эффективности организации конференций за счет разработки автоматизированной платформы, позволяющей гибко управлять мероприятиями без привлечения разработчиков. Ключевая идея — шаблон конференции, все параметры которого (структура, формы, сроки, оформление) настраиваются через единую CMS. Подход обеспечивает единообразие, снижает операционные затраты и улучшает взаимодействие участников.

Анализ предметной области и решений. Многие специализированные веб-приложения создаются как «одноразовые» и жестко привязаны к событию: при запуске новой конференции требуется правка кода и ручные обновления, что увеличивает сроки и стоимость [2]. Использовавшийся ранее шаблон на React давал базовый функционал, но любые изменения (секции,

формы, программа) требовали вмешательства в код; публикация шла через статические файлы, CMS и контроля версий контента не было, контейнеризация отсутствовала, работа с несколькими конференциями не поддерживалась. SaaS-платформы нередко дороги, функционально избыточны, сложны в интеграции и накладывают ограничения на хранение данных. Следовательно, целесообразно создать систему, сочетающую удобство CMS, мощную шаблонизацию, современные инструменты разработки и поддержки, а также мультитенантность.

Архитектура и технологии. Платформа имеет модульную архитектуру, что упрощает развитие и соответствует принципам системного анализа [3]. Выделены три компонента: фронтенд, бэкенд и административная CMS.

Фронтенд. Реализован на Nuxt 3 (TypeScript). Nuxt обеспечивает SSR для лучшей начальной загрузки и SEO, удобную файловую маршрутизацию и современный DX [4]. TypeScript снижает количество ошибок и упрощает сопровождение. Для состояния используется Pinia (простой, эффективный API). UI строится на Vuetify (Material Design-компоненты) и Tailwind CSS (гибкая настройка внешнего вида для разных конференций) [5]. Для взаимодействия с сервером — Axios по REST API.

Бэкенд. PHP/Laravel выбран благодаря развитой экосистеме, встроенной безопасности (защита от SQL-инъекций и CSRF), ORM Eloquent и удобной реализации RESTful-сервисов [6]. Встроенная CMS управляет сущностями (конференции, пользователи, заявки, секции, программы, роли) на основе MVC, что повышает чистоту кода и сопровождаемость. Аутентификация и авторизация реализованы через Gates/Policies с гибкой моделью прав (организатор, эксперт, участник).

Инфраструктура и развертывание. Хранилище — MySQL (надежность, целостность, сложные запросы). Приложение контейнеризовано на Docker с оркестрацией Docker Compose, что выравнивает среды разработки/тестирования/продакшена и упрощает масштабирование [7]. Используются Git и Linux-окружение.

Основной функционал.

1. Динамическая регистрация и подача заявок. Формы создаются и редактируются через CMS: типы полей, обязательность, загрузка файлов. Система валидирует данные (форматы, обязательные поля), присваивает статус «на модерации».

2. Централизованное администрирование. В административной панели доступны:

– управление базовой информацией (название, описание, даты, контакты);

– создание/редактирование тематических секций;

– назначение экспертов для слепого или открытого рецензирования;

– установка и контроль сроков (подача, рецензирование, формирование программы);

– просмотр/управление заявками, статусами и рецензиями.

3. Шаблонизация и визуальная кастомизация. Через CMS настраиваются структура форм и публичное представление: цветовые схемы, логотипы, расположение блоков; каждое мероприятие получает уникальный облик в рамках общей платформы.

4. Автоматическое формирование программы. После отбора заявок система генерирует программу; организатор корректирует ее drag-and-drop-интерфейсом, распределяя доклады по секциям и временным слотам. Итог публикуется на публичной странице с фильтрами по секциям и дням.

5. Мультитенантность и мультидоменность. В одной установке поддерживаются множество независимых конференций (изоляция данных, пользователей, настроек). Возможна привязка к отдельным поддоменам (напр., conf2024.university.ru), что облегчает брендинг и навигацию.

Преимущества и результаты внедрения.

1. Снижение затрат и сроков. Организаторы самостоятельно настраивают контент и структуру в CMS; запуск новой конференции сокращен с нескольких дней (ручное кодирование) до нескольких часов.

2. Централизация и автоматизация. Единое хранилище заявок, пользователей, рецензий и программ повышает целостность и безопасность данных. Автоматизируются валидация, уведомления о статусах, генерация программ и дипломов — меньше ошибок, больше времени на содержательные задачи.

3. Масштабируемость и сопровождаемость. Модульность, современные фреймворки и контейнеризация облегчают добавление функций, развертывание на разных серверах и устойчивую работу [7].

4. Универсальность и гибкость. Шаблонный подход и мультитенантность позволяют проводить десятки разноформатных мероприятий — от международных конференций до студенческих семинаров — на одной платформе.

5. Улучшение пользовательского опыта. Единые сценарии подачи, прозрачное рецензирование и удобная программа повышают удовлетворенность участников, экспертов и организаторов.

Заключение. Разработана и внедрена автоматизированная платформа для организации научных конференций, устраняющая недостатки традиционных методов и «одноразовых» приложений за счет сочетания шаблонизации, удобной CMS, мультитенантной архитектуры и современного стека (Nuxt 3, TypeScript, Pinia, Vuetify, Tailwind, Axios; Laravel, Eloquent, Gates/Policies; MySQL, Docker/Docker Compose, Git, Linux). Платформа демонстрирует адаптируемость, надежность и удобство для всех ролей. Результаты подтверждают целесообразность модульного подхода и выбранных технологий для сложных веб-систем в академической среде [3, 6, 8]. Внедрение стандартизировало процесс организации конференций в университете и существенно повысило его эффективность.

Список источников

[1] Рыжков И.Б. *Основы научных исследований и изобретательства.* Санкт-Петербург, Лань, 2013, 224 с.

[2] Антонов А.В. *Системный анализ.* Москва, Высшая школа, 2006, 454 с.
[3] Рубаненко Е.В. *Основы веб-разработки.* Москва, Юрайт, 2020, 320 с.
[4] *Официальная документация Tailwind CSS.* URL: https://tailwindcss.com/docs (дата обращения 25.05.2024).
[5] *Docker Documentation.* URL: https://docs.docker.com/ (accessed 25.05.2024).
[6] *Официальная документация Laravel.* URL: https://laravel.com/docs (дата обращения 25.05.2024).
[7] Фаулер М. *Паттерны корпоративных приложений.* Москва, Вильямс, 2019, 544 с.
[8] *IEEE Standard for Software Architecture Documentation.* URL: https://people.eecs.ku.edu/~hossein/Teaching/Stds/1471.pdf (дата обращения 25.05.2024).

Development of an automated platform for scientific conferences

Evteev Artyom Sergeevich evteevas@student.bmstu.ru
Vanakov Sergey Vladimirovich vanakovsv@student.bmstu.ru
Borsuk Natalia Alexandrovna borsuk@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article addresses the issue of low efficiency in traditional methods of organizing scientific conferences at Bauman Moscow State Technical University, which rely on manual data processing. It justifies the need for a web platform to automate these processes. The proposed solution is based on a modular architecture using Nuxt 3 and Laravel. A key feature is a template-based approach that enables managing the structure and content of multiple conferences through a single CMS without developer involvement. The paper describes the system's architecture, technologies, implemented functionality, and benefits, including data centralization, cost reduction, and scalability. Future development directions are outlined.

Keywords: *web application, scientific conference, automation, CMS, templating, Nuxt, Laravel, REST API, Docker, university, multitenancy*

УДК 004.42

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов сжатия без потерь для структурированных JSON-данных в распределенных системах

Яковенко Яков Владимирович sansskeletsans2005@yandex.ru
Борсук Наталья Александровна borsuk.65@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен сравнительный анализ четырех популярных алгоритмов: GZIP, LZMA, LZ4 и Zstandard, на репрезентативной выборке JSON-данных различного размера и структурной сложности. Целью данного исследования является определение наиболее эффективного алгоритма сжатия без потерь для обработки и передачи структурированных JSON-данных в контексте современных распределенных информационно-вычислительных систем. Актуальность работы обусловлена экспоненциальным ростом объема данных, генерируемых микросервисными архитектурами и системами обмена сообщениями, где JSON является де-факто стандартом сериализации. Рост объема данных создает повышенную нагрузку на пропускную способность сетей и объем хранилищ, что требует применения оптимизированных методов сжатия.

Ключевые слова: *распределенные вычисления, обработка JSON, сжатие данных, сетевая производительность, алгоритмы кодирования, анализ производительности, микросервисная архитектура*

Современные информационно-вычислительные системы и комплексы все чаще строятся по принципам распределенных архитектур, таких как микросервисы и контейнерная оркестрация. В таких системах интенсивный обмен данными между компонентами является нормой, а JSON (JavaScript Object Notation) утвердился в качестве одного из основных форматов для сериализации и передачи структурированных данных благодаря своей простоте, читаемости и широкой поддержке. Однако широкое использование JSON порождает серьезную проблему, связанную с избыточностью формата, что приводит к значительным затратам на хранение и, что более критично, на передачу данных по сети. В условиях высокой нагрузки это может стать узким местом, ограничивающим общую производительность и масштабируемость комплекса.

Предыдущие исследования по данной теме показали, что применение алгоритмов сжатия без потерь позволяет существенно сократить объем передаваемых данных [1, 2]. Традиционно для этих целей часто используется алгоритм GZIP, являющийся компромиссным решением. Несмотря на обширную научную литературу, опубликованную по вопросу сжатия данных, данное исследование фокусируется на недостаточно раскрытой проблеме сравнительного анализа современных высокоскоростных алгоритмов, таких как LZ4

и Zstandard, в специфическом контексте обработки JSON-данных в распределенных системах. В то время как классические работы [2] делают акцент на максимальной степени сжатия, современные реалии требуют учета фактора скорости, особенно скорости распаковки, которая критична для приложений, обрабатывающих потоки данных в реальном времени [3].

Цель данного исследования — провести всесторонний сравнительный анализ алгоритмов сжатия без потерь, ориентированный на задачи распределенных систем, и выявить оптимальные алгоритмы для различных сценариев использования. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: сформировать репрезентативный набор тестовых JSON-данных; отобрать популярные и перспективные алгоритмы сжатия; разработать методику измерения ключевых метрик производительности; провести эксперимент и проанализировать полученные результаты; сформулировать практические рекомендации для разработчиков [4].

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели был разработан следующий методологический аппарат.

1. Формирование тестового набора данных. Для обеспечения репрезентативности результатов был сгенерирован набор из 1000 JSON-файлов, разделенных на три категории, отражающие типичные сценарии использования в распределенных системах:

– малые объекты (500 Б–2 КБ): одиночные сообщения, DTO (Data Transfer Object);

– средние объекты (2 КБ–100 КБ): ответы от API, содержащие массивы данных, конфигурационные файлы;

– крупные объекты (100 КБ–5 МБ): дампы данных, лог-файлы в формате JSON, пакетные передачи.

Данные включали строковые, числовые, булевы значения и вложенные структуры.

2. Выбор и настройка алгоритмов сжатия. Были выбраны алгоритмы, представляющие разные компромиссы в пространстве «скорость–степень сжатия»:

– GZIP (DEFLATE): эталонный алгоритм, широко используемый в вебе и других системах;

– LZMA: алгоритм, ориентированный на максимальную степень сжатия;

– LZ4: высокоскоростной алгоритм, ориентированный на низкие задержки;

– Zstandard (ZSTD): современный алгоритм, предлагающий широкий спектр компромиссов за счет использования словарей.

Для всех алгоритмов использовались стандартные уровни сжатия по умолчанию, а для Zstandard дополнительно тестировался режим с заранее подготовленным словарем на основе подвыборки тестовых данных, что является рекомендуемой практикой для специфичных структур данных [4].

3. Процедура тестирования и измерения. Для каждого JSON-файла и каждого алгоритма выполнялась следующая процедура:

– исходные данные сериализовались в строку в кодировке UTF-8;

– выполнялась операция сжатия, замерялось время и объем сжатых данных;

– выполнялась операция распаковки, замерялось время.

Каждая операция повторялась 100 раз для одного файла, и результаты усреднялись для исключения выбросов. Для реализации использовался язык программирования Python 3.9 со следующими библиотеками: zlib (GZIP), lzma (LZMA), lz4 (LZ4), zstandard (ZSTD).

Результаты. Проведенный эксперимент позволил получить количественные данные по всем заявленным метрикам. Результаты для категории «Малые объекты» (усредненные по всем файлам категории) представлены в таблице.

Сравнительные характеристики алгоритмов сжатия (малые объекты)

Алгоритм	Коэффициент сжатия, %	Среднее время распаковки, мс
LZ4	92,3	0,05
LZMA	91,0	2,7
GZIP	77,0	0,35
ZSTD	74,7	0,1

Визуализация данных (см. рисунок) демонстрирует распределение алгоритмов в координатах «коэффицент сжатия / среднее время распаковки». Алгоритмы четко кластеризуются: LZ4 находится в области высокой скорости, LZMA — в области максимального сжатия, в то время как Zstandard обеспечивает высокую скорость операций.

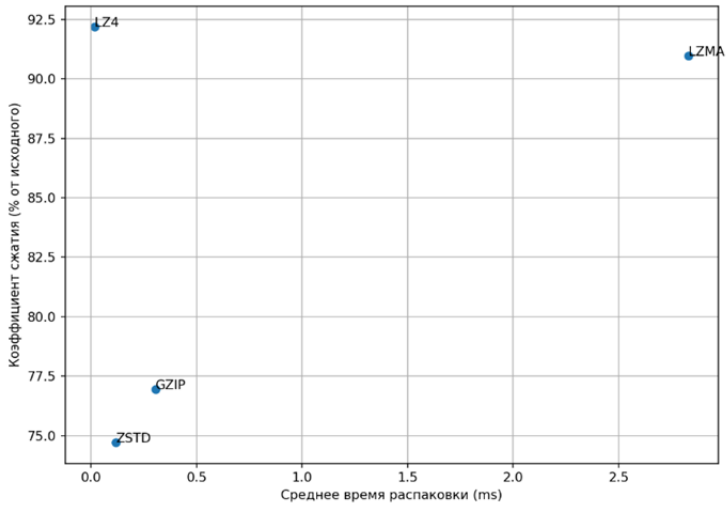


График сравнения алгоритмов сжатия

Анализ показал, что при обработке малых объектов (< 2 КБ) накладные расходы на инициализацию и буферизацию у сложных алгоритмов (таких как LZMA) могут нивелировать выигрыш в степени сжатия. Однако при увеличении размера данных до 100 КБ и более различия между методами становятся существенными, и преимущества Zstandard становятся наиболее выраженными.

Обсуждение результатов. Полученные данные полностью соответствуют заявленным характеристикам алгоритмов. LZ4 демонстрирует наивысшую скорость распаковки (≈ 0,05 мс), что объясняется его минимальной вычислительной сложностью. Это делает его оптимальным выбором для систем, где ключевым фактором является низкая задержка передачи данных — например, в Apache Kafka, Redis и других real-time-платформах [5].

Особое внимание заслуживает алгоритм Zstandard, показавший наилучший баланс между степенью сжатия и скоростью распаковки. Его результат (≈ 74,7 % от исходного размера при 0,1 мс) демонстрирует эффективность современного подхода, основанного на адаптивных словарях. Это позволяет ему на практике конкурировать с LZ4 по производительности, обеспечивая при этом значительно более высокую компрессию. Полученные данные согласуются с утверждениями разработчиков Zstandard [5] и подтверждают возможность его использования в системах хранения и передачи структурированных данных (например, JSON-форматов).

GZIP показал устойчивый, но устаревающий результат. Несмотря на надежность и широкую совместимость, его производительность заметно уступает современным решениям.

LZMA, в свою очередь, сохраняет лидерство по степени сжатия (≈ 91 %), но из-за времени распаковки свыше 2 мс применим, главным образом, в сценариях долговременного хранения, архивации и резервного копирования, где приоритетом является минимальный объем, а не скорость.

Заключение. Проведенное исследование позволило определить оптимальные подходы к выбору алгоритмов сжатия для структурированных данных (JSON) в распределенных системах. Основные выводы заключаются в следующем.

1. LZ4 является наилучшим выбором для систем, критичных к задержкам (real-time messaging, in-memory caching), благодаря минимальному времени распаковки.

2. Zstandard (ZSTD) рекомендуется как универсальное решение, обеспечивающее баланс между скоростью и эффективностью использования сетевых и вычислительных ресурсов. Его применение особенно эффективно в микросервисных архитектурах и системах межпроцессного взаимодействия.

3. GZIP и LZMA сохраняют значение в задачах, где важна совместимость или максимальное сжатие, но не скорость. Для высоконагруженных систем их использование нецелесообразно.

Практическая значимость результатов заключается в формировании критериев выбора алгоритмов компрессии, что позволяет архитекторам распределенных систем оптимизировать сетевой трафик.

В дальнейшем перспективным направлением является анализ влияния сжатия на энергопотребление вычислительных узлов, а также расширение исследования на бинарные форматы сериализации и динамические системы, способные адаптивно выбирать алгоритм сжатия в зависимости от характеристик нагрузки.

Список источников

[1] Akhmetshin E.M., Kozachek A.V., Vasilev V.L., Meshkova G.V., Mikhailova M.V. Development of digital university model in modern conditions: institutional approach. *Digital Education Review*, 2021, no. 40, pp. 17–32. https://doi.org/10.1344/der.2021.40.17-32

[2] Vishnevskaya J.A., Kovalenko M.V., Skvortsova M. Analysis of Methods of Illegal Personal Data Distribution of Messengers, Social Networks and Search Engines Users. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2021),* 2021, pp. 2404–2409. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396275

[3] Неустроев А.А. Сохранение JSON данных в базу данных SQLAlchemy. *Проблемы науки*, 2016, № 1, с. 15–18.

[4] Шляхтина Е.А., Гамаюнов Д.Ю. Обнаружение аномалий в составных объектах в формате JSON. *Прикладная дискретная математика*, 2022, № 2, с. 45–52.

[5] Князев И.В., Коптева А.В. Исследование структуры JSON API для пагинации веб-страниц с большим набором данных на примере курсорной пагинации. *International scientific review*, 2021, № 4, с. 23–29.

Comparative analysis of efficiency of lossless compression algorithms for structured JSON data in distributed systems

Yakovenko Yakov Vladimirovich sansskeletsans2005@yandex.ru
Borsuk Natalya Aleksandrovna borsuk.65@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper compares four popular algorithms: GZIP, LZMA, LZ4 and Zstandard, on a representative sample of JSON data of various sizes and structural complexity. The purpose of this study is to determine the most efficient lossless compression algorithm for processing and transmitting structured JSON data in the context of modern distributed information computing systems. The relevance of the work is due to the exponential growth in the amount of data generated by microservice architectures and messaging systems, where JSON is the de facto serialization standard. Data growth puts increased pressure on network bandwidth and storage capacity, requiring optimized compression methods.

Keywords: *distributed computing, JSON processing, data compression, network performance, coding algorithms, performance analysis, microservice architecture*

УДК 004.72

Разработка интерактивной информационной платформы для Спортивной школы Олимпийского резерва «Квант»

Григорьева Дарья Михайловна grigorevadm@student.bmstu.ru
Борсук Наталья Александровна borsuk@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено отсутствие цифровых решений для управления учебно-тренировочным процессом в спортивных школах на примере СШОР «Квант». Предложена интерактивная платформа, объединяющая планирование занятий, электронные журналы, учет посещаемости, хранение материалов и коммуникацию между тренерами, спортсменами и родителями. Разработана веб- и мобильная версия на React.js, Node.js и Flutter. Описаны ее функции: автоматизация расписаний, сбор и анализ данных, оценка динамики достижений. Внедрение системы повышает эффективность управления, снижает нагрузку и способствует цифровой трансформации спортивных школ.

Ключевые слова: *цифровизация, спортивное образование, информационная платформа, веб-приложение, мобильное приложение, управление тренировочным процессом, аналитика достижений*

Современное развитие спорта и образования требует использования эффективных инструментов для управления учебно-тренировочным процессом. На сегодняшний день большинство спортивных школ, включая СШОР «Квант», продолжают применять устаревшие методы учета и документооборота. В основном это бумажные журналы, таблицы Excel, мессенджеры и разрозненные электронные файлы, которые не обеспечивают прозрачность, оперативность и системность в управлении деятельностью. Такие подходы требуют много времени и усилий для заполнения, поиска информации и анализа данных, что снижает эффективность работы тренеров и сотрудников, а также препятствует своевременному принятию управленческих решений [1].

Существующий официальный сайт школы выполняет исключительно рекламно-информационную функцию: он размещает новости, расписания и контактные данные, но не обеспечивает полноценного учета тренировочного процесса и результатов спортсменов. В нем отсутствуют внутренние системы регистрации и авторизации участников, механизмы обмена сообщениями, автоматическое формирование расписаний, аналитика достижения целей и внедрение автоматизированных отчетов. В результате сотрудники вынуждены тратить много времени на ручное ведение данных и выполнять дополнительные бумажные процедуры, что негативно сказывается на качестве тренировочного процесса и мотивации спортсменов.

Целью разработки является повышение эффективности учебно-тренировочного процесса в СШОР «Квант» путем создания единой интерактивной информационно-тренировочной платформы, которая позволит автоматизиро-

вать управление учебным процессом, улучшить взаимодействие между тренерами, спортсменами и родителями, а также обеспечить удобный доступ к расписанию, методическим материалам и результатам.

Возникла необходимость в создании единой интегрированной цифровой платформы, которая объединит все функции управления, учета и анализа деятельности спортивной школы [2]. Такая система позволит автоматизировать рутинные процессы, снизить количество ошибок, повысить прозрачность и обеспечить оперативное реагирование на изменение ситуации. Кроме того, это повысит уровень взаимодействия между тренерами, спортсменами и родителями, сделает процесс обучения более современным и конкурентоспособным.

Таким образом, существующие ресурсы не соответствуют современным требованиям цифровизации и не позволяют эффективно управлять образовательным и спортивным процессом, что задает необходимость разработки качественной и функциональной платформы [3].

Разработка платформы преследует следующие задачи:

– автоматизация формирования расписания тренировок и соревнований;

– организация электронного учета посещаемости и результатов выполнения нормативов;

– создание внутреннего модуля коммуникации (чат, уведомления);

– хранение и предоставление методических и учебных материалов;

– внедрение аналитического модуля для отслеживания прогресса спортсменов.

Основные функциональные возможности системы.

1. Модуль расписания. Позволяет тренерам формировать и редактировать расписания занятий с учетом залов, видов спорта и состава групп. Родители и спортсмены видят актуальное расписание в своих личных кабинетах.

2. Учет посещаемости и нормативов. Встроенный журнал позволяет фиксировать результаты спортсменов, выполнять анализ динамики и формировать отчеты по каждому ученику.

3. Методическая база. Тренеры могут загружать видеоуроки, упражнения, рекомендации по восстановлению и питанию. Материалы структурируются по видам спорта и возрастным категориям.

4. Коммуникации. Чат и система уведомлений обеспечивают обратную связь между тренером, спортсменом и родителем, повышая вовлеченность участников.

5. Аналитика и статистика. Модуль визуализирует прогресс спортсменов и групп, помогает тренеру оценивать эффективность методик и корректировать тренировочные планы.

6. Мобильное приложение. Работает в офлайн-режиме, обеспечивает доступ к расписанию, достижениям и материалам без необходимости подключения к интернету.

Ролевая модель доступа:

– администратор управляет структурой, пользователями и настройками платформы;

– тренеры вводят и обновляют данные о тренировках, посещаемости и результатах;

– спортсмены и родители получают персонализированный доступ к информации о достижениях и расписании.

Техническая реализация:

– Frontend: React.js и TypeScript для создания адаптивного, высокопроизводительного и масштабируемого интерфейса;

– Backend: Node.js (Express.js) с REST API для надежного обмена данными между клиентом и сервером;

– база данных: PostgreSQL для хранения данных пользователей, расписания, результатов и аналитики;

– мобильное приложение: Flutter (Dart) — кроссплатформенное решение с поддержкой офлайн-доступа и единым интерфейсом;

– хранение файлов: Firebase Storage;

– безопасность: авторизация через JWT (JSON Web Token);

– развертывание: Docker и Nginx для удобного размещения и масштабирования платформы.

Данный технологический стек обеспечивает надежность, безопасность и удобство использования системы, а также предоставляет возможности для дальнейшего расширения и интеграции с государственными спортивными сервисами (например, ГТО, ГИС «Физкультура и спорт») [4].

Преимущества внедрения разработанной платформы. Внедрение разработанной платформы позволяет достичь следующих преимуществ по сравнению с традиционными методами управления и существующими решениями:

– снижение операционных затрат и временных потерь. Автоматизация расписаний, учета и коммуникаций сокращает время на организационные процессы. Тренеры и администраторы могут сосредоточиться на содержательной работе с учащимися;

– централизация данных и автоматизация рутины. Вся информация о спортсменах, посещаемости и достижениях хранится в единой базе данных, что исключает дублирование и повышает точность учета;

– повышение прозрачности и управляемости. Руководство школы получает инструмент для оперативного контроля, анализа и планирования тренировочного процесса;

– масштабируемость и сопровождаемость. Использование модульной архитектуры и контейнеризации (Docker) обеспечивает легкое добавление нового функционала и стабильную работу системы;

– улучшение взаимодействия участников. Благодаря чату и уведомлениям повышается качество коммуникации между тренером, родителем и спортсменом;

– гибкость и универсальность. Платформа может быть адаптирована под разные виды спорта и уровни подготовки, что делает ее применимой не только в СШОР «Квант», но и в других спортивных учреждениях.

Разработка и внедрение интерактивной платформы для СШОР «Квант» обеспечивает переход к современному цифровому управлению учебно-тренировочным процессом. Платформа способствует снижению административной нагрузки, улучшению коммуникации между всеми участниками процесса и повышению прозрачности деятельности школы. Полученные результаты демонстрируют, что подобная система способна стать универсальным решением для спортивных образовательных учреждений различного уровня, создавая основу для дальнейшей цифровой трансформации отрасли физической культуры и спорта [5].

Список источников

[1] Попова О.В. Процесс цифровизации в образовательных учреждениях: опыт и перспективы. *Образовательные технологии*, 2019, № 4, с. 15–22.

[2] Левин В.Г., Смирнов А.П. *Разработка и внедрение веб-приложений для образовательных учреждений.* Москва, Научное издательство, 2020, 250 с.

[3] Баланов А.Н. *Комплексное руководство по разработке: от мобильных приложений до веб-технологий.* Санкт-Петербург, Лань, 2025, 412 с.

[4] Хока Е.В. *Современные информационные технологии в управлении деятельностью спортивной школы.* Дис. ... канд. пед. наук. Сургут, 2006, 215 с.

[5] Стеценко Н.В. Цифровые решения актуальных вопросов в сфере физической культуры и спорта. *Научно-спортивный вестник*, 2023, № 4, с. 45–52.

Development of an interactive information platform for the Sports School of the Olympic Reserve Kvant

Grigorieva Darya Mikhailovna grigorevadm@student.bmstu.ru
Borsuk Natalia Aleksandrovna borsuk@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article examines the lack of digital solutions for managing the educational and training process in sports schools using the example of SSHOR "Kvant". An interactive platform is offered that combines class planning, electronic journals, attendance records, storage of materials, and communication between coaches, athletes, and parents. A web and mobile version based on React has been developed.js, Node.js and Flutter. Its functions are described: automation of schedules, data collection and analysis, evaluation of achievement dynamics. The implementation of the system increases management efficiency, reduces workload and contributes to the digital transformation of sports schools.

Keywords: *digitalization, sports education, information platform, web application, mobile application, training process management, achievement analytics*

УДК 004.42

Разработка специализированного программного обеспечения для автоматизации проведения соревнований по скалолазанию

Васильев Александр Алексеевич vasilevaa5@student.bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследованы проблемы автоматизации подсчета результатов и управления соревнованиями по скалолазанию. На основе анализа существующих решений и данных опроса организаторов соревнований выявлены ключевые недостатки коммерческих и профессиональных платформ, а также недостатки, связанные с использованием электронных таблиц в процессе соревнований. Обоснована необходимость разработки нового специализированного программного обеспечения, адаптированного к требованиям соревнований регионального и муниципального уровня. Описаны возможности разрабатываемого программного обеспечения, выбранный технологический стек (C#, WPF, SQLite, Entity Framework Core) и текущая функциональность будущей системы.

Ключевые слова: *скалолазание, автоматизация соревнований, .NET, WPF, EF Core, SQLite, паттерн MVVP*

Проведение соревнований по скалолазанию требует не только оперативного и корректного подсчета результатов, но и быстрого, а главного правильного оформления итоговых документов, для чего необходима автоматизация всех процессов фиксации и обработки информации.

Для выявления существующих проблем в организации документооборота в процессе проведений соревнований был проведен опрос среди 10 организаторов соревнований муниципального и регионального уровня (руководители региональных федераций, спортивных клубов, главные судьи соревнований) из 4 регионов Российской Федерации: Москвы, Московской, Калужской и Тульской областей.

Для проведения опроса были сформулированы следующие ключевые темы исследования:

– какие средства автоматизации применяют организаторы при проведении соревнований;

– какие трудности возникают в их работе наиболее часто;

– насколько используемое ПО удовлетворяет потребности, и с какими функциональными или техническими ограничениями сталкиваются организаторы;

– какие функции и инструменты в ПО видят организаторы, как наиболее важные для повышения эффективности своей работы.

Анализ полученных данных показал, что наиболее распространенными являются два готовых специализированных решения.

1. Профессиональная система «ФСР 1С» [1]. Система изначально предназначена для проведения всероссийских соревнований и поддерживает возможность вести онлайн-трансляцию результатов. Данное решение сложно в освоении и обладает избыточным функционалом для соревнований регионального и муниципального уровня.

2. Коммерческая система climbing-events.ru [2]. Эта система, функционирующая по модели подписки (1 % от стартового взноса), популярна на коммерческих фестивалях. Она не обеспечивает полноценной поддержки требований Федерации Скалолазания России (ФСР), что делает неудобным ее использование на официальных соревнованиях со строгими требованиями к протоколам и отчетности.

Общим ограничением для обеих систем является их ориентация на онлайн-ввод результатов, что требует стабильного интернет-соединения на протяжении всего мероприятия и наличия дополнительной судейской техники (планшетов, ноутбуков для судей на трассе).

В условиях отсутствия доступных и удобных специализированных решений организаторы массово прибегают к использованию таблиц Microsoft Excel с различной степенью автоматизации (макросы, формулы). Данный подход порождает целый комплекс проблем:

– выполнение многочисленных ручных операций (сортировка, вставка строк, копирование формул) увеличивают вероятность некорректных расчетов результатов;

– программная реализация сложных алгоритмов, обусловленных правилами соревнований, например алгоритм тай-брейка (одинаковые результаты), сопряжена со значительными трудностями в реализации. В результате подобные случаи также обрабатываются организаторами вручную;

– использование макросов может вызвать конфликт с системами безопасности на компьютерах;

– возникновение сложностей с совместимостью файлов между разными версиями Excel, что затрудняет тиражирование шаблонов между компьютерами организаторов;

– отсутствие централизованной базы данных. Каждое соревнование представляет собой новый файл, что затрудняет возможность накопления и анализа исторических данных о спортсменах и их результатах.

Проведенное исследование демонстрирует, что существующие программные решения для автоматизации соревнований по скалолазанию не удовлетворяют запросам организаторов мероприятий регионального и местного уровня. Профессиональные системы избыточны, а коммерческие — функционально ограничены. Вынужденное использование Excel влечет за собой существенные неудобства и риски.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована задача по разработке нового специализированного программного обеспечения. Целью разработки является создание гибкого, удобного и надежного программного обеспечения, которое устранит выявленные недостатки. Разрабатываемое программ-

ное обеспечение представляет собой информационную систему, обеспечивающую:

– автоматизацию обработки результатов соревнований;

– ведение реестра спортсменов;

– формирование официальных протоколов для присвоения разрядов;

– генерацию отчетной документации по требованиям ФСР;

– надежное хранение истории соревнований;

– локальное выполнение на компьютерах организаторов;

– простоту тиражирования.

В качестве основы для разработки был выбран стек C#/.NET, обеспечивающий высокую производительность, надежность и строгую типизацию.

Для реализации пользовательского интерфейса используется WPF (Windows Presentation Foundation), который обеспечивает ускорение разработки благодаря встроенной поддержке паттерна MVVM.

В роли СУБД используется SQLite [3], которая отличается простотой развертывания, так как не требует запуска отдельного сервера СУБД. Это локальное решение обеспечивает необходимую производительность и надежность для поставленных задач.

Доступ к данным реализован с помощью Entity Framework Core (EF Core) [4]. Данный ORM-фреймворк предоставляет высокоуровневую абстракцию, позволяя взаимодействовать с базой данных через объекты C#, минимизируя необходимость написания SQL-запросов. Сущности EF Core напрямую интегрируются в слой Model паттерна MVVM.

Выбранный технологический стек не только эффективно решает текущие задачи, но и обеспечивает гибкость для будущего развития. Кроссплатформенная природа .NET и EF Core позволяет легко адаптировать приложение для работы с различными СУБД и ОС. При переносе приложения на Linux (включая отечественные дистрибьютивы) или другие платформы, ключевую роль играет архитектура MVVM [5]: строгое разделение на Model (данные, бизнес-логика), View (интерфейс) и ViewModel (логика представления, связывающая Model и View) позволяет сохранить основной код при переходе с WPF на кроссплатформенные фреймворки.

В результате, поддержка новой платформы сводится в основном к адаптации пользовательского интерфейса, а не к переписыванию всей системы.

Разработка специализированного программного обеспечения, основанного на выбранных решениях, позволит создать эффективную, легко тиражируемую и технически надежную систему автоматизации ведения соревнований, соответствующую потребностям организаторов соревнований регионального и муниципального уровня.

К настоящему времени реализованы:

– управление данными спортсменов: модуль для ведения базы данных спортсменов (добавление, редактирование, поиск);

– управление категориями: модуль для создания и настройки категорий (возрастных групп и пола) участников;

– работа с соревнованиями: модуль для создания и управления соревнованиями. Выбор категории, количества раундов, судей, участников и других параметров;

– базовый пользовательский интерфейс: разработан и внедрен унифицированный интегрированный интерфейс;

– ввод результатов: заложена основа и частично реализован механизм для последующего внесения итоговых данных по соревнованиям.

В ходе последующей разработки и тестирования дополнительно планируется реализация следующих возможностей и модулей:

– система подготовки отчетных документов о проведенном соревновании;

– добавление дисциплин;

– поддержка фестивальных форматов проведений соревнований;

– поддержка проведения многоэтапных соревнований;

– создание системы статистики по спортсменам и соревнованиям.

Таким образом, в процессе исследований и разработки были решены следующие задачи: выполнен обзор существующих решений, показавший необходимость разработки собственного программного продукта, а также определены программные средства для реализации системы автоматизации проведения соревнований по скалолазанию. Произведена разработка демоверсии собственной системы; определены направления дальнейшего ее развития.

Список источников

[1] *Портал ФСР — руководство пользователя и вход.* URL: http://portal.rusclimbing.ru/ (дата обращения 10.10.2025). не очень корректно давать ссылку, если для входа нужно запрашивать логин пароль у админа сайта

[2] *Climing Events — возможности и тарифы.* URL: https://climbing-events.ru/tariff (дата обращения 10.10.2025).

[3] *SQlite — Appropriate Uses For SQLite.* URL: https://sqlite.org/whentouse.html (accessed 10.10.2025).

[4] Смит Дж.П. *Entity Framework Core в действии.* Москва, ДМК Пресс, 2022, с. 57–58.

[5] Арораа Г., Чилберто Дж. *Паттерны проектирования для C# и платформы .NET Core.* Санкт-Петербург, Питер, с. 275–283.

Development of specialized software for automation of climbing competitions

Vasiliev Alexander Alekseevich vasilevaa5@student.bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problems of the results that were counted in automation and management of the sport climbing competition were studied. Based on the analysis of the existing decisions and the survey data from (the) competition organizers we highlight key shortcomings of the com-

mercial and professional platforms, as well as shortcomings due to the use of electronic displays used in the process of the competitions. The need of development of new specialized software solution, adapted to the needs of the tournament of the regional and municipal levels is justified. Possibilities of developing software support, chosen technological stack (C#, WPF, SQLite, Entity Framework Core) and the current functionality of future systems is thoroughly described.

Keywords: *sport climbing, the automation of the tournament, .NET, WPF, EF Core, SQLite, pattern MVVP*

УДК 004

Применение интеллектуальных алгоритмов для бронирования номеров в гостиницах

Косова Ксения Алексеевна ksenya.kosova.04@mail.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilychev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Описано исследование, целью которого являлась разработка методики взаимодействия с базой данных по запросам арендаторов номеров в гостиницах с целью прогнозирования вероятности бронирования. Программа реализована в виде интеллектуального алгоритма на языке Python с использованием библиотек Pandas, Statsmodels, Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, CatBoost. Проведен корреляционный анализ признаков и построена модель логистической регрессии. Реализованы модели градиентного бустинга и несколько других. Произведено сравнение метрик качества предсказаний для каждой модели и выбран алгоритм, дающий наибольшую точность прогнозирования вероятности бронирования номеров.

Ключевые слова: *персонализированное бронирование, предиктивная аналитика, машинное обучение, Python, Pandas, Statsmodels, Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, learning-to-rank*

В современных системах онлайн-бронирования гостиниц традиционно применяются статистические методы и базовые алгоритмы машинного обучения. Классические подходы часто ограничены в точности прогнозирования пользовательских предпочтений [1]. Существующие решения обычно фокусируются либо на задаче классификации, либо на ранжировании, но не объединяют эти подходы комплексно [2]. Актуальность исследования обусловлена ростом конкуренции на рынке онлайн-бронирований и необходимостью повышения точности персонализированных рекомендаций. Современные платформы требуют интеллектуальных систем, способных не только предсказывать вероятность бронирования, но и оптимально ранжировать предложения для каждого пользователя.

Цель исследования — разработка комплексной методики прогнозирования бронирований гостиниц, сочетающей задачи классификации и ранжирования с использованием современных алгоритмов машинного обучения, а также сравнение точности предсказаний вероятности бронирования с использованием разных интеллектуальных моделей.

В работе использованы программные технологии Python с библиотеками Pandas для обработки данных [3], Scikit-learn для базовых алгоритмов, XGBoost, LightGBM и CatBoost для градиентного бустинга [4].

В основу исследования положен датасет Expedia Personalized Sort [5], содержащий информацию о поисковых запросах пользователей и их взаимодействии с результатами поиска.

Вначале была осуществлена многоэтапная предварительная обработка исходных данных, включающая удаление аномальных значений, фильтрацию выбросов и создание производных признаков для улучшения предсказательной способности моделей и построена матрица корреляций, позволившая выбрать наиболее важные для предсказания признаки.

Разработана программа на Python, реализующая шесть различных методов машинного обучения. Каждый из них был выбран исходя из его теоретических преимуществ для решения задач классификации и ранжирования: логистическая регрессия, случайный лес, XGBoost (Extreme Gradient Boosting), LightGBM, CatBoost. Для решения только задачи классификации использован метод LightGBM Ranker.

Для обучения моделей использовалось разделение данных на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) выборки. Все эксперименты проводились на одинаковых данных для обеспечения корректности сравнения.

Экспериментальное исследование проводилось на выборке 780 483 записей после предварительной обработки данных. Сравнительный анализ шести алгоритмов машинного обучения выявил существенные различия в их эффективности.

Новизна разработки заключается в комбинированном подходе, объединяющем задачу бинарной классификации (бронирование/не бронирование) и задачу ранжирования отелей внутри поисковой сессии. Предложена оригинальная методика оценки, использующая две группы метрик: AUC-ROC для оценки качества классификации и NDCG@5 для оценки качества ранжирования, что соответствует подходу использования данных и алгоритмов для прогнозирования будущих событий [6].

Значения полученных метрик AUC и NDCG@5 для всех рассмотренных методов предиктивной аналитики показаны на рис. 1.

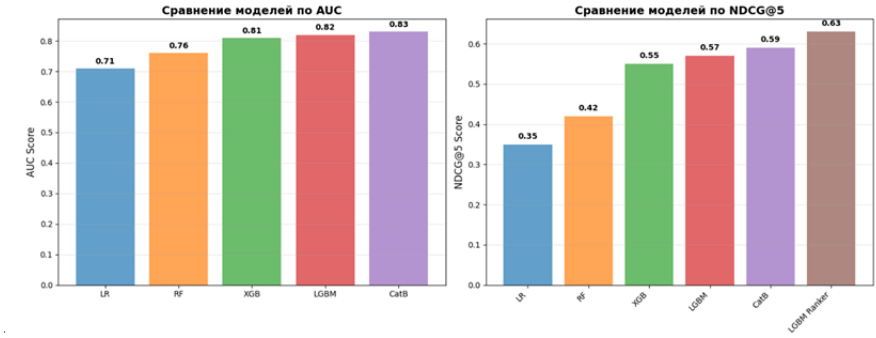


Рис. 1. Зависимость значений полученных метрик от типа модели

Логистическая регрессия показала AUC = 0,71 и NDCG@5 = 0,35. Эти результаты соответствуют ожиданиям для линейной модели, которая, хотя и обеспечивает хорошую интерпретируемость, но ограничена в учете сложных нелинейных зависимостей в данных.

Алгоритм случайного леса демонстрирует устойчивость к шумам и способность улавливать нелинейные зависимости. В нашем исследовании это подтвердилось значениями AUC = 0,76 и NDCG@5 = 0,42, что на 7 и 20 % соответственно превышает показатели логистической регрессии.

Наибольший интерес представляют результаты алгоритмов градиентного бустинга. XGBoost достиг AUC = 0,81 и NDCG@5 = 0,55. Более современная реализация LightGBM показала незначительное улучшение — AUC = 0,82 и NDCG@5 = 0,57. Алгоритм CatBoost продемонстрировал наилучшие результаты среди классификаторов — AUC = 0,83 и NDCG@5 = 0,59.

Специализированный алгоритм LightGBM Ranker показал исключительную эффективность в метрике NDCG@5 = 0,63, что на 23 % превышает результат CatBoost и на 80 % — логистической регрессии. Это объясняется тем, что алгоритм изначально оптимизирован для задач ранжирования и учитывает групповую структуру данных поисковых сессий.

Далее для подтверждения результатов были построены ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic) — графики, используемые для визуализации производительности бинарной классификации модели.

На рис. 2 изображены графики оценки качества бинарных классификаторов (ROC-кривые), полученные по результатам оценки алгоритмов градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM, CatBoost).

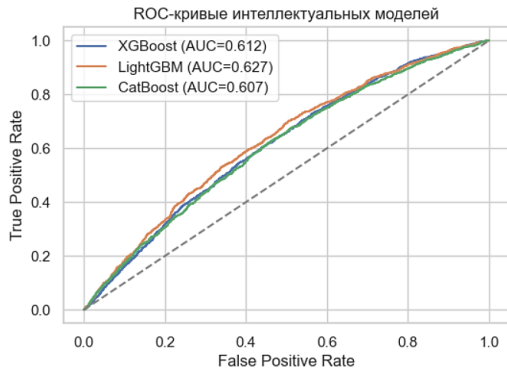


Рис. 2. Графики оценки качества бинарных классификаторов

Эти графики показывают, что метод LightGBM дает наилучшее качество прогнозирование вероятности бронирования номеров в случае решения только проблемы классификации (при выборе единственного номера для бронирования, когда ранжирование не имеет значения).

Таким образом, по результатам анализа графиков на рис. 1 и 2 можно сделать следующий вывод: для реализации системы для оценки вероятности бронирования отдельных номеров в отелях целесообразнее всего использовать метод LightGBM, как дающий наилучшие результаты, а в системах, где крити-

чески важно точное ранжирование предложений арендуемых номеров (топ-5 рекомендаций) рекомендуется использование метода LightGBM Ranker.

При комбинированном решении задач классификации и ранжирования наиболее точного прогнозирования можно добиться с помощью модели CatBoost.

В работе продемонстрирована эффективность применения современных алгоритмов машинного обучения для прогнозирования бронирований в гостиничном бизнесе. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований, включая интеграцию нейросетевых архитектур, учет временных факторов и анализ текстовой информации пользовательских отзывов для еще более точного прогнозирования пользовательских предпочтений.

Список источников

[1] Friedman J., Hastie T., Tibshirani R. *The Elements of Statistical Learning.* Springer, 2017.

[2] Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference*, 2016. https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.02754

[3] Ильичев В.Ю., Драч В.Е., Пацукевич А.Н. Использование технологий глубокого обучения для формирования моделей ценообразования. *Системный администратор*, 2024, № 5(258), с. 92–96.

[4] Ильичев В.Ю., Жукова Ю.М., Шамов И.В. Использование технологии градиентного бустинга для создания аппроксимационных моделей. *Заметки ученого*, 2021, № 12-1, с. 62–67.

[5] *Personalize Expedia Hotel Searches.* URL: https://www.kaggle.com/c/expedia-personalized-sort (accessed 22.10.2025).

[6] Liu T.-Y. Learning to rank for information retrieval. *Foundations and trends in information retrieval*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 225–331. http://doi.org/10.1561/1500000016

Application of intelligent algorithms for hotel room reservation

Kosova Ksenia Alekseevna **ksenya.kosova.04@mail.ru**
Vershinin Evgeny Vladimirovich **vershinin@bmstu.ru**
Ilyichev Vladimir Yuryevich **ilychev.vyu@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article describes a study aimed at developing a methodology for processing a database (open dataset) at the request of hotel room tenants in order to predict the likelihood of booking. The program is implemented as an intelligent algorithm in Python using the Pandas, Statsmodels, Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, CatBoost libraries. A correlation analysis of the features was performed and a logistic regression model was constructed. Gradient boosting models and several others have been implemented that can predict the probability of booking for each hotel. Prediction quality metrics were compared for each model and an algorithm was selected that gives the highest accuracy in predicting the probability of booking rooms.

Keywords: *personalized booking, predictive analytics, machine learning, Python, Pandas, Statsmodels, Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, learning-to-rank*

УДК 004

Анализ рыночных решений и обоснование разработки собственной системы учета мероприятий и планирования задач спортивного клуба

Васильченко Анна Юрьевна vasilchenkoayu@student.bmstu.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilychev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследованы проблемы управления в спортивном клубе «Звездный путь», вызванные неэффективностью традиционных методов и ограничениями рыночных решений. Проведен сравнительный анализ платформ (Trello, Asana, Monday.com и др.) по ключевым критериям: интерфейс, функциональность и стоимость. Выявлено, что сложный UI, высокая цена и отсутствие интеграции задач с мероприятиями делают их малопригодными для клуба. Обоснована разработка собственной системы на React, Tailwind CSS, Node.js и Express. Ключевые преимущества: интуитивный интерфейс, гибкое управление ролями и глубокая интеграция процессов, адаптированная под специфику клуба. Определены направления для будущих исследований.

Ключевые слова: *спортивные НКО, управление мероприятиями, планирование задач, пользовательский интерфейс*

Спортивный клуб КФ МГТУ «Звездный путь» занимается организацией спортивных мероприятий и поддержкой студенческого спорта. В структуре клуба есть администратор (ответственный за организацию мероприятий), медиа-отдел (фотографы, видеографы, редакторы, дизайнеры, журналисты), активисты (поддерживающие спортсменов на мероприятиях), председатель (глава клуба) и кураторы спортивных направлений. Клуб сталкивается с проблемами управления мероприятиями и задачами из-за неэффективности традиционных инструментов, таких как Excel и email, и ограничений рыночных решений, включая сложные интерфейсы и недостаточную адаптацию [1–5]. Рыночные платформы предлагают универсальный функционал, но их сложность и стоимость ограничивают применимость для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь».

Цель работы — анализ рыночных решений и обоснование разработки собственной системы учета мероприятий и планирования задач для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь».

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи: произвести систематизацию данных о платформах, произвести сравнительный анализ существующих решений и обосновать разработку собственной системы.

Результатом данного исследования является разработка концепции собственной системы с макетами интерфейса (дашборд, календарь, Kanban-

доска, форма входа), оптимизированной для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь», а также рекомендаций по ее технической реализации.

Рыночные решения для управления мероприятиями и задачами ориентированы на универсальные проекты, но их пользовательские интерфейсы часто перегружены избыточными функциями, что усложняет их использование для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь». Анализ проводился с фокусом на функциональный пользовательский интерфейс (UI) и эргономичную реализацию ключевых функций: календарь, управление задачами, уведомления, кастомизация ролей и мобильный доступ.

Рассмотрим существующие рыночные решения, позволяющие производить учет мероприятий и планирование задач для спортивных клубов.

Trello [1]: интерфейс Kanban-досок прост и интуитивен, поддерживает перетаскивание карточек для управления задачами. Календарь через Google Calendar базовый без гибкой фильтрации. Уведомления ограничены email в бесплатной версии. Кастомизация ролей минимальна, что неудобно для разделения прав (администраторы, тренеры, волонтеры). UI прост, но не поддерживает интеграцию задач с мероприятиями, которая нужна для нашего клуба.

Asana [2]: интерфейс с Gantt-диаграммами и дашбордами визуально насыщен, но сложен для новичков, требует обучения. Календарь удобен, поддерживает фильтрацию событий. Уведомления (push/email) доступны в премиум-версии. Мобильное приложение функционально, но реклама в бесплатной версии отвлекает. Кастомизация ролей гибкая, но платная. UI перегружен функциями, избыточными для нашего клуба, где нужны только базовые возможности.

Monday.com [3]: кастомизируемые дашборды и календарь предлагают гибкость, но интерфейс сложен из-за обилия настроек. Уведомления (push/email) настраиваемы, но требуют навыков. Мобильное приложение кроссплатформенное. Кастомизация ролей высокая, но интерфейс ориентирован на крупные проекты, а не на наш клуб, что делает его избыточным.

Microsoft Planner [4]: интерфейс интегрирован с Teams/Outlook, прост для пользователей MS-экосистемы. Календарь базовый, без Gantt-диаграмм. Уведомления через Teams/email интуитивны. UI прост, но зависимость от экосистемы снижает гибкость для нашего клуба.

АИС «Спортивные мероприятия» [5]: интерфейс с централизованным календарем устарел. Уведомления осуществляются только через email, кастомизация ролей фиксирована. UI не интуитивен, управление задачами ограничено, что снижает оперативность, и отсутствует необходимая интеграция.

Анализ рыночных решений позволил выявить следующие проблемы: сложные и перегруженные интерфейсы (Asana, Monday.com), ограниченная кастомизация ролей (Trello, АИС), зависимость от экосистем (Microsoft Planner) и отсутствие интеграции задач с мероприятиями. Необходимые функции (интуитивный UI, гибкий ролевой доступ, интеграция) минимальны по сравнению с избыточными (сложные дашборды, API), что делает платформы неоптимальными для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь».

Таким образом, рыночные решения не соответствуют потребностям спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь». Trello и АИС имеют простые, но ограниченные UI, не поддерживающие гибкую кастомизацию ролей и интеграцию задач с мероприятиями. Asana и Monday.com предлагают мощные функции, но их сложные интерфейсы требуют длительного обучения, а стоимость велика. Microsoft Planner удобен в MS-экосистеме, но ограничен в гибкости. Отсутствие бесшовной интеграции задач с мероприятиями приводит к необходимости ручной синхронизации и, как следствие, к появлению ошибок.

Предлагаемая собственная система, создаваемая специально для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь», должна устранять эти недостатки, предлагая интуитивный UI с минималистичным дизайном, гибким ролевым доступом и интеграцией задач с мероприятиями.

Для создания системы выбраны технологии, обеспечивающие интуитивный UI и производительность. Для создания фронтенда используется библиотека React, т. к. благодаря компонентному подходу, она может обеспечить быструю отрисовку календаря и Kanban-доски [6]. Адаптивный, минималистичный дизайн, удобный для пользователей с разным уровнем подготовки можно создать с помощью Tailwind CSS [7]. Node.js с Express обеспечивает асинхронный бэкенд для RESTful API и уведомлений [8, 9]. HTTPS и ролевой доступ гарантируют безопасность [10], а Web Push API позволяет отправлять пользователям push-уведомления даже тогда, когда сайт закрыт или браузер неактивен [11]. Эти технологии обеспечивают экономичность и удобство UI.

Макеты системы, разработанные на React и Tailwind CSS, ориентированы на UX-принципы: простота, доступность, интуитивность [12]. Основными компонентами макета являются:

– дашборд: центральная панель с виджетами событий, задач и аналитики позволяет производить подсчет числа мероприятий и обработку их результатов. Минималистичный дизайн с крупными шрифтами и цветовым кодированием упрощает восприятие;

– календарь мероприятий планируется интерактивным с цветовым кодированием (тренировки, соревнования) и фильтрацией. Навигация (день, неделя, месяц) и drag-and-drop будут интуитивно понятны, всплывающие подсказки призваны минимизировать ошибки;

– Kanban-доска содержит колонки «К выполнению», «В работе», «Выполнено» для управления задачами с привязкой к мероприятиям. Перетаскивание карточек и индикаторы дедлайнов упрощают работу. Адаптивный дизайн удобен на мобильных устройствах;

– форма входа: страница авторизации с полями логина/пароля и возможностью восстановления пароля. Использование высококонтрастных цветов и автозаполнения снижают барьер входа.

Эргономичность UI достигается минимумом элементов, высококонтрастными темами, крупными шрифтами и откликом менее 2 секунд. Адаптивный дизайн поддерживает любые устройства.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Анализ рыночных решений (Trello, Asana, Monday.com, Microsoft Planner, АИС) показал их ограничения для спортивного клуба КФ МГТУ «Звездный путь»: сложные и перегруженные UI, ограниченная кастомизация ролей, отсутствие интеграции задач с мероприятиями и высокая стоимость.

2. Предлагаемая собственная система на React, Tailwind CSS, Node.js, Express и Web Push API обеспечит минималистичный UI, гибкий ролевой доступ и бесшовную интеграцию задач с мероприятиями. Макеты (дашборд, календарь, Kanban-доска, форма входа) оптимизированы для обеспечения удобства пользователей. Разработка собственной системы необходима для устранения ограничений рыночных решений и упрощения координации в спортивном клубе КФ МГТУ «Звездный путь».

Следующим этапом работы над описываемым проектом будет являться детальная разработка такой интегрированной системы учета мероприятий и планирования задач спортивного клуба.

Список источников

[1] *Task Management Guide.* URL: https://trello.com/guide (accessed 06.10.2025).

[2] *Project Management Platform.* URL: https://asana.com/ru (дата обращения 06.10.2025).

[3] *Features for Events and Tasks.* URL: https://monday.com/features (accessed 06.10.2025).

[4] *Microsoft Planner Documentation.* URL: https://support.microsoft.com/planner (accessed 06.10.2025).

[5] *Министерство спорта РФ. АИС «Спортивные мероприятия»: описание системы.* URL: https://minsport.gov.ru/activities/ais (дата обращения 06.10.2025).

[6] *Official Documentation.* URL: https://reactjs.org/docs/getting-started.html (accessed 06.10.2025).

[7] *Official Documentation.* URL: https://tailwindcss.com/docs (accessed 06.10.2025).

[8] *Official Documentation.* URL: https://nodejs.org/en/docs/ (accessed 06.10.2025).

[9] *Official Documentation.* URL: https://expressjs.com/ (accessed 06.10.2025).

[10] *Security Guidelines.* URL: https://owasp.org/www-project-top-ten/ (accessed 06.10.2025).

[11] *Web Push API Documentation.* URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Push_API (accessed 06.10.2025).

[12] *Web Accessibility Guidelines*. URL: https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/wcag/ (accessed 06.10.2025).

Analysis of market solutions and justification for the development of its own system of accounting for events and planning tasks of a sports club

Vasilchenko Anna Yurievna vasilchenkoayu@student.bmstu.ru
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yuryevich ilychev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The problems of managing events and tasks in small sports NGOs related to the inefficiency of traditional tools and the limitations of market solutions are considered. A comparative analysis of the platforms (Trello, Asana, Monday.com, Microsoft Planner, AIS) according to the criteria of UI, functionality and cost. It is shown that complex interfaces, high cost and lack of integration of tasks with events limit their applicability. The development of our own system based on React, Tailwind CSS, and Node is justified.js and Express with intuitive UI, flexible role access and integration. It is concluded that the system minimizes costs and simplifies coordination, and is applicable to NGOs.

Keywords: *sports NGOs, event management, task planning, user interface*

УДК 004.42

Разработка WPF-приложения для отслеживания рабочих процессов и сбора статистики

Кузьменко Даниил Владимирович kdv24ki175@student.bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследована недостаточная эффективность существующих систем управления рабочими процессами (Trello, Asana, Monday.com, Microsoft Planner, АИС), обусловленная высокой стоимостью, избыточным функционалом, сложностью интерфейсов или, напротив, недостаточной автоматизацией упрощенных решений. На основе анализа требований разработано десктопное приложение на платформе .NET с использованием WPF, архитектурного паттерна MVVM и СУБД SQLite, реализующее иерархическое управление персоналом, отслеживание задач и сбор статистики по ключевым метрикам — статусам задач, соблюдению сроков и загрузке сотрудников. Предложенное решение ориентировано на малый и средний бизнес и перспективно для интеграции с корпоративными системами и развития аналитических функций.

Ключевые слова: *архитектура WPF-приложения, управления рабочими процессами, SQLite, система визуализации данных, механизмы автоматического расчета статистических показателей*

В условиях стремительной цифровизации экономики и усиления конкуренции на рынке эффективное управление человеческими и организационными ресурсами становится стратегическим приоритетом для предприятий всех масштабов. Особенно остро проблема оптимизации управленческих процессов стоит перед субъектами малого и среднего предпринимательства (МСП), которые, несмотря на ограниченные финансовые и кадровые ресурсы, вынуждены обеспечивать высокий уровень операционной эффективности и гибкость в управлении.

Современные подходы к управлению персоналом все чаще опираются не только на субъективные оценки руководителей, но и на объективные данные, полученные в результате систематического сбора и анализа статистики по выполнению задач, загрузке сотрудников, соблюдению сроков и другим ключевым показателям производительности. Однако на практике многие организации сталкиваются с отсутствием адекватных инструментов, способных одновременно обеспечить простоту внедрения, соответствие локальным бизнес-реалиям (в частности, российскому документообороту), автономность работы и надежность хранения данных.

Существующие программные решения можно условно разделить на три категории: корпоративные ERP-системы, облачные SaaS-платформы и самодельные Excel-решения. Каждая из них имеет существенные ограничения,

делающие их малопригодными для широкого применения в сегменте МСП. В связи с этим возникает необходимость в разработке специализированного программного продукта, сочетающего функциональную достаточность, техническую надежность, простоту использования.

Целью настоящего исследования является разработка и реализация специализированного десктопного программного обеспечения для управления рабочими процессами и сбора статистических данных, ориентированного на потребности малого и среднего бизнеса.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

– провести анализ существующих решений в области управления рабочими процессами и выявить их ключевые недостатки;

– сформулировать требования к новому программному продукту;

– обосновать выбор технологического стека и архитектурных решений;

– реализовать прототип приложения, включающий базовые модули управления персоналом, задачами и организационной структурой;

– определить перспективные направления дальнейшего развития системы.

Исследование проводилось в два этапа: аналитический и разработческий.

На аналитическом этапе был выполнен сравнительный анализ трех основных классов решений.

1. Корпоративные ERP-системы (1С: Управление нашей фирмой, SAP Business One): характеризуются высокой функциональностью, но требуют значительных затрат на лицензирование, внедрение и обучение персонала, а также часто избыточны для небольших компаний.

2. Облачные SaaS-платформы (Trello, Asana, Jira): отличаются гибкостью и простотой старта, однако не поддерживают российские стандарты делопроизводства, зависят от стабильного интернет-соединения и вызывают опасения в части защиты конфиденциальных данных.

3. Самодельные решения на основе Microsoft Excel: наиболее распространены в МСП из-за низкого порога входа, но страдают от отсутствия контроля целостности данных, невозможности централизованного доступа, сложности автоматизации и высокого риска ошибок при ручном вводе.

В результате анализа было установлено, что ни один из существующих классов решений не обеспечивает комплексного удовлетворения потребностей малого бизнеса. Это подтвердило гипотезу о необходимости создания нового программного продукта.

На основе выявленных проблем были сформулированы требования к новому решению:

– локальное размещение данных (без зависимости от облака);

– поддержка иерархической структуры организации;

– возможность отслеживания задач с контролем сроков и статусов;

– автоматизация сбора статистики и формирования отчетов;

– простота установки и интуитивная понятность интерфейса;

– совместимость с существующими бизнес-процессами.

Опишем технологический стек, выбранный на разработческом этапе.

Язык программирования и платформа: C# в рамках .NET 7 [1] обеспечивает высокую производительность, строгую типизацию и кроссплатформенную совместимость (в перспективе).

Пользовательский интерфейс: реализован с использованием WPF (Windows Presentation Foundation), что позволяет создавать богатые и отзывчивые интерфейсы с поддержкой современных графических элементов.

Архитектурный паттерн: MVVM (Model-View-ViewModel) обеспечивает четкое разделение бизнес-логики, представления и логики взаимодействия с пользователем, упрощая тестирование и сопровождение кода.

Система управления базами данных: SQLite [2], встраиваемая, серверная СУБД, не требующая отдельной установки, обеспечивающая надежное хранение данных в одном файле и достаточную производительность для задач МСП.

ORM-фреймворк: Entity Framework Core позволяет работать с базой данных через объектную модель, минимизируя необходимость написания «сырых» SQL-запросов и повышая безопасность за счет предотвращения SQL-инъекций.

Методология разработки — итеративная, с поэтапной реализацией модулей и их промежуточным тестированием. Разработанное приложение представляет собой автономное десктопное решение для Windows, реализующее следующие функциональные модули:

1. Управление сотрудниками:

– добавление, редактирование и удаление записей о сотрудниках;

– поиск по ФИО, должности, идентификатору;

– хранение контактной и организационной информации.

2. Система задач:

– создание задач с указанием исполнителя, срока, приоритета и статуса;

– визуальное отображение просроченных, текущих и завершенных задач;

– возможность комментирования и прикрепления файлов (в перспективе).

3. Иерархическая структура организации:

– назначение руководителей и подчиненных;

– визуализация дерева подчинения;

– поддержка наставничества и временного делегирования полномочий.

4. Сбор и визуализация данных:

– автоматический учет времени выполнения задач;

– формирование базовых статистических отчетов (например, «загрузка сотрудника», «выполненные задачи за период»);

– цветовая индикация статусов (зеленый — завершено, желтый — в работе, красный — просрочено).

Архитектура приложения построена по принципу MVVM [3]: Model содержит сущности (Employee, Task, Department) и логику работы с данными через EF Core; View реализует пользовательский интерфейс на XAML; ViewModel обеспечивает связь между представлением и моделью, обрабатывая команды пользователя и обновляя данные.

Такой подход обеспечивает высокую степень модульности, тестируемости и потенциала для масштабирования.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило наличие значительного разрыва между потребностями малого и среднего бизнеса в области управления рабочими процессами и возможностями существующих программных решений. Разработанное десктопное приложение на платформе .NET с использованием C#, WPF [4], SQLite и Entity Framework Core успешно устраняет ключевые недостатки альтернативных подходов: оно не требует постоянного подключения к интернету, не накладывает избыточных финансовых и технических обязательств, обеспечивает централизованное хранение данных и поддерживает иерархическое управление персоналом.

На текущем этапе реализованы базовые функции, достаточные для практического применения в небольших организациях. В перспективе планируется расширение функциональности за счет:

– внедрения расширенной аналитики (графики производительности, тепловые карты загрузки);

– модуля учета рабочего времени и расчета KPI;

– системы уведомлений (локальных и, при необходимости, через email);

– интеграции с внешними системами электронного документооборота (например, «Контур.Диадок» или «СБИС»);

– разработки мобильного клиента для iOS и Android с синхронизацией через локальную сеть;

– поддержки импорта/экспорта данных в формате Excel для обеспечения совместимости с устоявшимися практиками.

Таким образом, исследование не только выявило актуальную проблему в области цифрового управления персоналом, но и предложило технически обоснованное, практически применимое решение, обладающее потенциалом для дальнейшего развития и коммерциализации.

Список источников

[1] Троелсен Э., Джепикс Ф. *C# 9.0 и платформа .NET 5. Разработка и оптимизация.* Москва, Диалектика, 2021, 1056 с.

[2] *Using SQLite: Small. Fast. Reliable. Choose Any Three.* URL: https://akawah.ru/linux/sqlite.html (дата обращения 18.10.2025).

[3] *Модель-представление-ViewModel (MVVM).* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm (accessed 18.10.2025).

[4] Фримен А., Джонс А. *Паттерны проектирования для WPF и Silverlight.* Москва, ДМК Пресс, 2012, 432 с.

Development of a WPF application for workflow tracking and statistics collection

Kuzmenko Daniil Vladivirovich kdv24ki175@student.bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The paper investigated the insufficient efficiency of existing workflow management systems (Trello, Asana, Monday.com, Microsoft Planner, AIS), due to high cost, excessive functionality, complexity of interfaces, or, conversely, insufficient automation of simplified solutions. Based on the analysis of requirements, a desktop application was developed on the .NET platform using WPF, the MVVM architectural pattern and the SQLite DBMS, which implements hierarchical personnel management, tracking tasks and collecting statistics on key metrics — task statuses, deadlines and employee load. The effectiveness of the solution has been confirmed by experiments with volumes of up to hundreds of users and thousands of tasks. Data visualization provides a visual representation of information. The proposed solution is focused on small and medium-sized businesses and is promising for integration with corporate systems and the development of analytical functions.

Keywords: *WPF application architecture, workflow management, SQLite, data visualization system, automatic statistical indicators calculation mechanisms*

УДК 004.72

Разработка веб-платформы поддержки психологического благополучия студентов

Ванаков Сергей Владимирович vanakovsv@student.bmstu.ru
Евтеев Артем Сергеевич evteevas@student.bmstu.ru
Борсук Наталья Александровна borsuk@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема ограниченной доступности существующих инструментов психологической поддержки студентов. Обоснована необходимость создания единой веб-платформы с личными кабинетами студентов и специалистов, интеграцией с календарями, системой уведомлений и поддержкой PWA-формата. Особенностью решения является модульная архитектура и использование ИИ для подбора материалов без оценки состояния пользователя. Показаны архитектура, функционал и преимущества внедрения.

Ключевые слова: *веб-платформа, психологическая поддержка, студенты, онлайн-запись, календарь, уведомления, безопасность, конфиденциальность, чат, рекомендации*

Введение. Проблематика психологического благополучия студентов требует инструментов, которые будут снижать барьер к обращению за помощью и упрощать организацию консультаций. Традиционные каналы (почта, мессенджеры, таблицы) остаются неэффективными, поскольку затрудняют координацию, ведут к потерям контекста и не обеспечивают сквозную аналитику. Разрабатываемая платформа будет направлена на решение этих ограничений за счет создания единой веб-среды с ролевой моделью доступа, сквозной регистрацией обращений и автоматизацией напоминаний о встречах [1, 2]. Научная новизна работы будет заключаться в интеграции современных веб-технологий (PWA, REST API, iCalendar) и этически ограниченного ИИ-модуля рекомендаций в единую инфраструктуру цифровой поддержки студентов. Практическая значимость предполагается в возможности внедрения платформы в образовательную среду университета для оптимизации взаимодействия между обучающимися и специалистами. В качестве ожидаемых пользовательских ценностей планируются: быстрое бронирование времени, прозрачная коммуникация до и после сессии, хранение истории и доступ к проверенным материалам.

Цель работы — повышение доступности и эффективности психологической помощи студентам за счет веб-платформы, которая будет позволять: регистрировать обращения, планировать консультации, проводить коммуникацию в защищенном канале, а также формировать рекомендации обучающимся в формате статей и упражнений. Для достижения цели предусматривается выполнение задач по проектированию архитектуры, выбору

механизмов безопасности, разработке и последующей реализации ключевых пользовательских сценариев, а также организации наблюдаемости (учет обращений, загрузка специалистов, показатели использования).

Архитектура и используемые технологии. Система планируется как трехзвенное модульное веб-приложение, включающее клиентскую часть, сервер приложений и реляционное хранилище данных. Такой подход должен обеспечить гибкость, масштабируемость и надежность функционирования [3].

Клиентская часть будет выполнена в формате прогрессивного веб-приложения (PWA), что позволит устанавливать систему на мобильные устройства, работать офлайн и получать push-уведомления о статусах записей и предстоящих встречах [4, 5]. Использование современных веб-технологий (service worker, application manifest) обеспечит кеширование данных и высокую отзывчивость интерфейса. Взаимодействие с сервером будет осуществляться через защищенные REST-запросы.

Сервер приложений будет реализовывать RESTful API и управлять бизнес-логикой системы. Предусматривается наличие трех ролей пользователей: студента, специалиста и администратора — с разграничением прав доступа. Планируется внедрение механизмов аутентификации, журналирования действий и шифрования данных на транспортном и прикладном уровнях, что будет соответствовать современным требованиям безопасности [2].

Хранилище данных предполагается построить на основе PostgreSQL, где будут храниться пользователи, записи, сессии, сообщения и события календаря. СУБД обеспечит транзакционную целостность и эффективную обработку аналитических запросов при росте нагрузки [3].

В совокупности проектируемая архитектура должна объединить устойчивость серверной логики, интерактивность клиентского интерфейса и надежность реляционной СУБД, создавая основу для стабильной работы и дальнейшего развития платформы [3–5].

Основной функционал системы. Ключевой функционал для студента: регистрация и вход, короткая анкета для уточнения запроса, просмотр расписаний специалистов, онлайн-запись, уведомления о статусе и напоминания о встречах, встроенный чат и доступ к истории обращений. Дополнительно предусматривается разработка рекомендательного блока, где ИИ по тексту запроса или анкеты будет предлагать тематические статьи и упражнения. При этом система не будет оценивать психическое состояние и не будет выполнять диагностику — функционал ограничится задачей подбора и поиска релевантных материалов.

Функционал специалиста будет включать личный кабинет с управлением слотами времени, обработкой заявок (подтверждение, перенос, отказ), отметкой факта проведения консультации и ведением переписки через защищенный чат. Также будет доступна сводная статистика по проведенным встречам [6].

К общесистемным возможностям планируется отнести: безопасную аутентификацию с ролевой моделью доступа, интеграцию с календарными сервисами (синхронизация слотов, экспорт событий в формате iCalendar .ics,

добавление встречи в календарь пользователя), e-mail и push-уведомления, PWA-сборку, хранение данных в PostgreSQL и накопление метрик использования для последующего анализа.

С методической точки зрения при проектировании будут использованы принципы модульной архитектуры и разделения ответственности между подсистемами, что упростит развитие и тестирование [1, 2]. Для пользовательского опыта планируется акцентировать внимание на минимизации числа кликов до записи, четких визуальных подтверждениях статусов, информативных пустых состояниях и приватности интерфейсов (отображение только релевантных сущностей, отсутствие пересечения чатов и записей между пользователями).

Для поддержки календарей будет реализована возможность экспорта событий в формате .ics и двусторонняя синхронизация слотов, что позволит устранить рассогласование расписаний. Сервис уведомлений будет реализовывать каскадную доставку (e-mail → web push) с учетом согласий пользователей и часовых поясов [5].

Преимущества и результаты внедрения. Ожидаемые результаты внедрения будут выражаться в сокращении времени организационных операций (поиск времени, подтверждения, напоминания), снижении количества пропусков за счет автоматических нотификаций и повышении прозрачности коммуникации.

Для администраторов предполагается формирование целостной статистики: динамики обращений, загрузки специалистов, среднего времени ожидания, доли перенесенных и пропущенных встреч — эти показатели будут служить основой для оптимизации расписаний и распределения ресурсов. Развертывание в PWA-формате должно снизить входной порог для студентов и повысить вероятность повторного обращения [4].

Ограничения и этика: ИИ-подсистема будет строго ограничена задачами подбора контента и упражнений по ключевым словам и тексту запроса/анкеты; оценка психологического состояния и клинические заключения не будут выполняться. Это планируется явно отразить в интерфейсе и документации сервиса. Обработка персональных данных будет сопровождаться шифрованием, применением принципа минимизации и контролем прав доступа.

Заключение. Веб-платформа будет направлена на объединение инженерной надежности и гуманитарной чувствительности к контексту пользователя. Планируется реализация лаконичных пользовательских сценариев, прозрачных статусов обращений и этически безопасного механизма рекомендаций материалов, не предусматривающего автоматической оценки состояния пользователя [2].

Дальнейшее развитие проекта предполагает расширение интеграций с кампусными системами университета, внедрение инструментов аналитики (в том числе когортного анализа удержания), а также разработку модулей групповых встреч и супервизии специалистов. Все новые функции будут реализовываться с сохранением приоритета приватности, пользовательских согласий и безопасности данных [2, 4, 6].

Список источников

[1] Фаулер М. *Паттерны корпоративных приложений.* Москва, Вильямс, 2019, 560 с.

[2] Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice.* Addison-Wesley, 2021, 608 p.

[3] *PostgreSQL Global Development Group.* URL: https://www.postgresql.org/docs/ (accessed 28.09.2025).

[4] *Google Developers. Progressive Web Apps (PWA).* URL: https://web.dev/learn/pwa (accessed 28.09.2025).

[5] *Web Notifications and Push API. MDN Web Docs.* URL: https://developer.mozilla.org/ (accessed 28.09.2025).

[6] Shanmugasundaram M. *Building a Real-Time Chat App with Node.js and WebSocket.* Packt Publishing, 2022, 180 p.

Development of an automated platform for scientific conferences

Vanakov Sergey Vladimirovich vanakovsv@student.bmstu.ru
Evteev Artyom Sergeevich evteevas@student.bmstu.ru
Borsuk Natalia Alexandrovna borsuk@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article addresses the problem of limited accessibility of existing tools for psychological support of students. It substantiates the need to develop a unified web platform with personal accounts for students and specialists, calendar integration, a notification system, and PWA support. A key feature of the solution is its modular architecture and the use of AI to recommend materials without assessing the user's condition. The paper presents the system's architecture, functionality, and implementation benefits.

Keywords: *web platfor, psychological support, students, online booking, calendar, notifications, security, confidentiality, chat, recommendations*

УДК 004.31

Многофункциональный тестовый стенд для диагностики оборудования АЗС

Макеев Владислав Романович makeev.vlados.9.2005@gmail.com
Онуфриева Татьяна Александровна onufrievata@mail.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена разработка многофункционального тестового стенда для диагностики оборудования автоматизированных заправочных станций (АЗС). Представлена модульная архитектура стенда на базе микроконтроллера ARM Cortex-M3, поддерживающего интерфейсы UART, CAN, дискретные вводы/выводы и ADC. Показаны алгоритмы обработки команд, система диагностики и обработки ошибок, а также механизм отчетности в реальном времени. Сделаны выводы, что предложенное решение позволяет эффективно тестировать и калибровать оборудование АЗС, обеспечивая высокую надежность и масштабируемость. Стенд может применяться производителями и сервисными организациями в области топливной автоматизации.

Ключевые слова: *тестовый стенд, диагностика АЗС, микроконтроллер ARM, модульная архитектура, CAN шина*

Введение. В настоящее время практически все автоматизированные заправочные станции (АЗС) оснащены сложным электронным оборудованием, которое требует регулярной диагностики, калибровки и тестирования для обеспечения бесперебойной работы. Для контроля работоспособности таких компонентов, как топливораздаточные колонки, дисплеи, клавиатуры и датчики, традиционно используются специализированные тестовые платы и стенды. Однако существующие решения часто обладают ограниченной функциональностью, что делает процесс диагностики трудоемким и не всегда охватывающим все возможные сценарии работы оборудования.

Для выполнения комплексного контроля параметров и функциональности оборудования АЗС был разработан многофункциональный тестовый стенд. Данная система позволяет проводить углубленную диагностику, эмулируя работу ключевых компонентов станции в различных режимах, и обеспечивает надежную проверку их взаимодействия в условиях, максимально приближенных к реальным.

Основная часть. Стенд построен на 32-битном микроконтроллере с ядром ARM Cortex-M3 [1, 2], обеспечивающем высокую производительность для обработки множества параллельных задач. Система использует модульную архитектуру, где каждый функциональный блок отвечает за конкретный аспект тестирования. Обобщенная структура стенда представлена на рис. 1.

Система поддерживает четыре основных интерфейса связи:

– UART/RS-232 — основной канал связи с управляющим ПК;

– CAN шина — промышленный интерфейс для работы с автомобильной периферией;

– дискретные входы/выходы — управление реле и считывание состояний датчиков;

ADC — мониторинг аналоговых сигналов и напряжений.

Блок-схема алгоритма основного цикла контроля представлен на рис. 2.

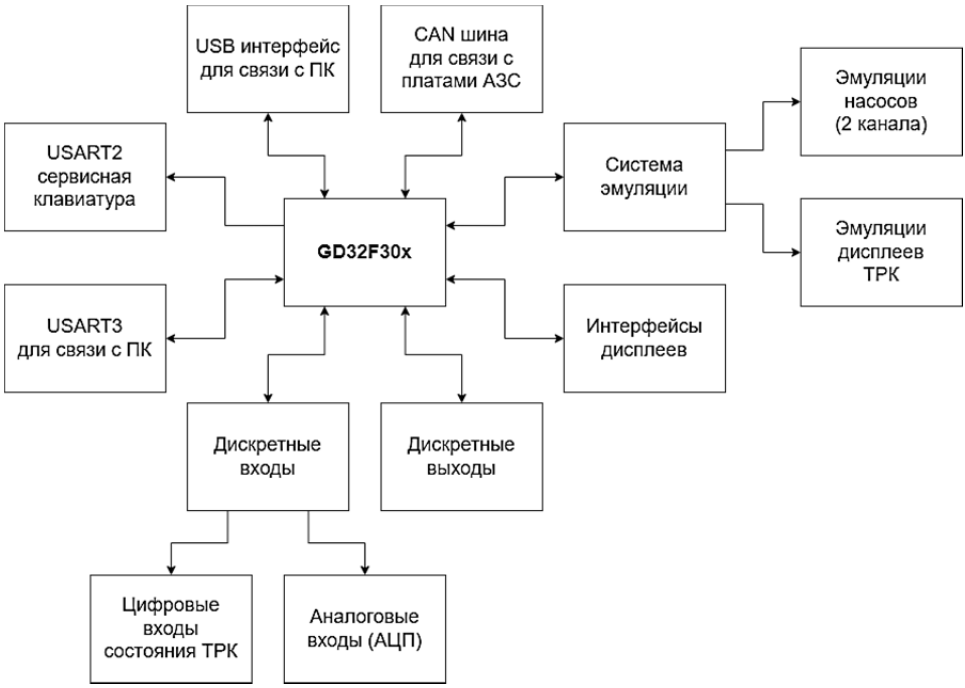


Рис. 1. Обобщенная структура стенда

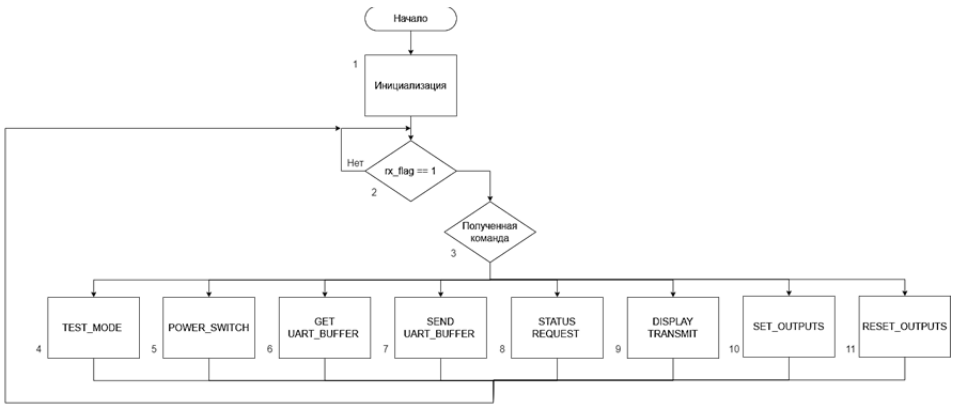


Рис. 2. Блок-схема основного цикла

Особенности алгоритма тестирования стенда ТРК. Основной цикл обработки. Особенности алгоритма:

– событийно-ориентированная архитектура — обработка по флагу rx_flag;

– модульность — каждая команда обрабатывается в отдельном case;

– гарантированный ответ — на каждую команду формируется ответ (статус или ошибка);

– буферизация — двойные буферы для приема/передачи (512 байт).

Обработка команд в основном цикле:

CMD_SET_TEST_MODE — установка режима тестирования:

Алгоритм: изменение глобального режима работы стенда.

CMD_POWER_SWITCH — управление питанием:

Алгоритм: включение/выключение питания стенда.

CMD_GET_UART_BUFFER — чтение UART буфера:

Алгоритм: чтение накопленных данных из кольцевого буфера USART.

CMD_SEND_UART_BUFFER — отправка UART данных [3]:

Алгоритм: передача данных через USART интерфейс.

CMD_STATUS_REQUEST — запрос состояния:

Алгоритм: формирование полного статуса всех подсистем.

CMD_SET_OUTPUTS / CMD_RESET_OUTPUTS — управление выходами:

Алгоритм: побитовое управление дискретными выходами с валидацией индексов.

CMD_DISPLAY_TRANSMIT_SEQUENCE — передача на дисплей:

Алгоритм: битово-ориентированная передача данных на эмулятор дисплея.

CAN команды — работа с CAN шиной [4]:

Алгоритм: буферизованный обмен CAN сообщениями.

На рис. 3 представлено фото разработанного стенда.

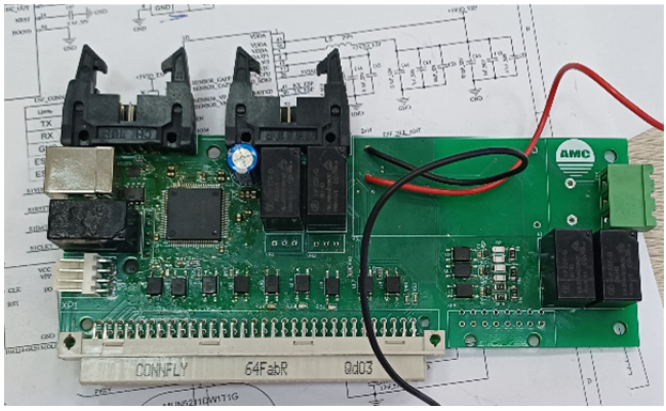


Рис. 3. Готовая модель стенда

Система диагностики и обработки ошибок позволяет реализовать:
– детальный статус всех подсистем в реальном времени;
– коды ошибок с категоризацией по серьезности;
– статистика производительности и счетчики событий.
Надежность:
– избыточные проверки целостности данных;
– защита от переполнения буферов;
– контроль временных параметров.
Пример кода:

```
/**
 * @brief Обработчик прерывания приема байта пакета запроса
 * @param[in] rx_byte — принятый байт
*/
uint32_t config_async_rx_isr(uint8_t rx_byte)
{
 if(rx_buffer == 0) return 0;
 if(uart_byte_cnt > rx_length ) return 0;
 switch (uart_byte_cnt)
 {
 case 0:
 if( rx_byte == SYNC_BYTE )
 {
 uart_byte_cnt++;
 crc = 0;
 async_set_timeout(BOOT_RECEIVE_TIMEOUT);
 }
 break;
 case 1:
 rx_dev_addr = rx_byte;
 uart_byte_cnt++;
 crc = upd_crc(crc, rx_byte);
 break;
 case 2:
 rx_dev_addr |= ((uint32_t)rx_byte<<8);
 uart_byte_cnt++;
 crc = upd_crc(crc, rx_byte);
 break;
 case 3:
 frame_length = rx_byte;
 rx_buffer[0] = rx_byte;
 uart_byte_cnt++;
 crc = upd_crc( crc, rx_byte );
 break;
 case 4:
 frame_length |= ((uint32_t)rx_byte<<8);
 rx_buffer[1] = rx_byte;
 if( frame_length > rx_length )
 frame_length = rx_length;
 uart_byte_cnt++;
 crc = upd_crc( crc, rx_byte );
 break;
 default:
```

```
/* Принимаем байты – сохраняем их считая CRC */
if( uart_byte_cnt == ( frame_length + 5 ) )
{
/* Примем 1-й байт контрольной суммы */
rx_crc = rx_byte;
uart_byte_cnt++;
}
else
{
if( uart_byte_cnt == ( frame_length + 6 ) )
{
/* Примем 2-й байт контрольной суммы */
rx_crc |= ((uint32_t)rx_byte<<8);
/* сбсроим приемик и таймаут */
async_set_timeout(0);
uart_byte_cnt = 0;
/* Сравним CRC */
if( rx_crc == crc && rx_dev_addr == CONFIG_DEV_ADDRESS)
{
/* принят пакет */
return rx_dev_addr;
}
}
else
{
/* Остальный байты пакета */
rx_buffer[ uart_byte_cnt-3] = rx_byte;
uart_byte_cnt++;
crc = upd_crc(crc, rx_byte);
}
}
break;
}
return 0;
}
```

Преимуществом разработки является:

– модульность разработки, что позволяет легко добавлять новую периферию; тестировать компоненты по отдельности; заменять алгоритмы без влияния на систему;

– масштабируемость позволяет поддерживать добавление новых каналов ТРК; подключение дополнительных интерфейсов; расширение возможностей эмуляции.

Заключение. Данный тестовый стенд представляет собой комплексное решение для проверки оборудования АЗС, сочетающее в себе точную эмуляцию реальных устройств с гибкостью программного управления. Использование современных алгоритмов обработки данных и надежных протоколов связи делает его эффективным инструментом для производителей и сервисных организаций в области топливной автоматизации. Разработка стенда проводилась на базе ООО «АМС».

Список источников

[1] Громов Ю.Ю., Дьяков И.А., Романенко А.В. *Микроконтроллеры с ядром Cortex-M3 в системах управления и автоматики.* Москва, Вузовское образование, 2019, 215 с.

[2] Морохин Д.В., Мясников В.И., Иванов А.В. *Микропроцессорные системы на основе микроконтроллеров STM32: лабораторный практикум.* Йошкар-Ола, Поволжский государственный технологический университет, 2023, 112 с.

[3] Заец Н.И. *Радиолюбительские конструкции на PIC-микроконтроллерах.* Москва, СОЛОН-ПРЕСС, 2011, 238 с.

[4] *GD32 MCU Firmware Library.* URL: https://gd32mcu.com/en/download/5 (accessed 20.05.2024).

Multifunctional test bench for gas station equipment diagnostics

Makeev Vladislav Romanovich makeev.vlados.9.2005@gmail.com
Onufrieva Tatyana Alexandrovna onufrievata@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The development of a multifunctional test bench for the diagnosis of automated filling stations (gas stations) is considered. The modular architecture of the stand based on the ARM Cortex-M3 microcontroller, which supports UART, CAN, discrete I/O and ADC interfaces, is presented. Command processing algorithms, a diagnostic and error handling system, and a real-time reporting mechanism are shown. It is concluded that the proposed solution makes it possible to effectively test and calibrate gas station equipment, ensuring high reliability and scalability. The stand can be used by manufacturers and service organizations in the field of fuel automation.

Keywords: *test bench, gas station diagnostics, ARM microcontroller, modular architecture, CAN bus*

УДК 004.048

Выбор между проводной и беспроводной связью серверного модуля с микроконтроллером для системы коммутации высокочастотных цепей

Боловинов Константин Максимович bolovinovkm@student.bmstu.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлено исследование двух способов организации связи между микроконтроллером и серверным модулем в рамках разработки устройства коммутации высокочастотных цепей (КВЦ), предназначенного для управления ВЧ-трактом спутниковой антенны. Рассмотрены проводной интерфейс USB и беспроводная технология Bluetooth. Основное внимание уделено практической реализации, временным характеристикам передачи данных и сравнению аппаратных и программных требований. Эксперименты показали, что оба подхода обеспечивают надежную передачу команд, однако USB демонстрирует преимущество в скорости и простоте интеграции.

Ключевые слова: *микроконтроллер, USB, Bluetooth, коммутация ВЧ-цепей, последовательная связь, Arduino UNO, серверный модуль, временные задержки*

Разработка современных систем управления радиочастотными трактами требует надежного и эффективного взаимодействия между вычислительными модулями и периферийными устройствами. В рамках проекта по созданию коммутатора высокочастотных цепей (КВЦ), предназначенного для управления ВЧ-трактом спутниковой антенны, возникает задача выбора оптимального способа связи между микроконтроллером и серверным модулем. Сервер должен передавать управляющие команды, а микроконтроллер — корректно их интерпретировать и переключать соответствующие порты ВЧ-тракта.

В данной работе рассматриваются два наиболее распространенных способа связи: проводной — через универсальную последовательную шину (USB), и беспроводной — с использованием технологии Bluetooth. Целью исследования является сравнительный анализ этих технологий по критериям реализуемости, скорости передачи данных, аппаратной и программной сложности.

Рассмотрим организацию методов исследования и аппаратной части экспериментальной установки.

В качестве микроконтроллера использовалась платформа Arduino UNO. Серверный модуль реализован в виде консольного приложения на языке C# (.NET 8.0), запущенного на компьютере со следующими характеристиками: ОС Windows 10, процессор AMD Ryzen 7 5700U (1.8 ГГц), оперативная память 16 ГБ, SSD-накопитель объемом 512 ГБ.

Для оценки производительности связи был реализован тестовый сценарий: сервер последовательно отправляет 100 строковых сообщений микроконтроллеру, каждое из которых содержит порядковый номер и временную

метку. Микроконтроллер обрабатывает сообщение, добавляет собственную временную метку и отправляет ответ обратно. Сервер фиксирует третью временную метку и сохраняет полную запись в файл. Временные метки измеряются в миллисекундах и позволяют оценить задержки на каждом этапе передачи.

Реализация проводной связи (USB). USB (Universal Serial Bus) представляет собой стандарт последовательной связи, обеспечивающий высокую совместимость и простоту подключения [1]. Для реализации связи через USB использовался встроенный последовательный порт Arduino UNO, работающий на скорости 9600 бод [2].

Серверное приложение автоматически определяет COM-порт, к которому подключен микроконтроллер, по наличию идентифицирующего сообщения (“isArduino”). После установления соединения осуществляется циклическая передача данных с фиксацией временных меток.

Эксперимент показал следующие результаты:

– общее время передачи 100 сообщений: 103 секунды;

– средняя задержка «сервер → микроконтроллер»: 1029 мс;

– средняя задержка «микроконтроллер → сервер»: 4,81 мс.

Программная реализация не требует установки дополнительных библиотек, поскольку стандартные средства .NET (пространства имен System.IO и System.IO.Ports) обеспечивают полную функциональность для работы с последовательным портом.

Реализация беспроводной связи (Bluetooth). Bluetooth — это технология беспроводной связи, которая основана на использовании ультракоротких радиоволн, работающий в диапазоне ISM (2,4 ГГц) [3]. Для беспроводной связи использовался модуль HC-05 [4]. Модуль подключен к Arduino UNO через программный UART (пины 10 и 11) с учетом необходимости согласования уровней напряжения (3,3 В для HC-05 и 5 В для Arduino).

Перед началом экспериментов модуль был сконфигурирован с помощью AT-команд: установлено имя устройства (“bluetoothKB”), пароль («1234») и скорость передачи данных (9600 бод). Серверное приложение использует стороннюю библиотеку 32feet.NET для обнаружения Bluetooth-устройств, установления соединения и обмена данными через виртуальный последовательный порт (SPP) [5].

Эксперимент со связью Bluetooth показал следующие результаты:

– общее время передачи 100 сообщений: 107 секунд;

– средняя задержка «сервер → микроконтроллер»: 1035 мс;

– средняя задержка «микроконтроллер → сервер»: 5,3 мс.

Видно, что несмотря на схожие с USB временные характеристики, программная реализация связи с Bluetooth требует дополнительной настройки: установки библиотеки, обработки байтовых потоков и управления состоянием соединения.

Сравнительный анализ характеристик двух способов связи приведен в таблице.

Сравнительный анализ характеристик USB и Blootooth связи

Тип связи	USB	Bluetooth
Дальность связи	Ограничена длиной кабеля (~3–5 м)	До 5–10 м (в условиях прямой видимости)
Скорость передачи	Незначительно выше	Сопоставима, но с большей дисперсией
Аппаратная сложность	Минимальная (встроенный порт)	Требуется внешний модуль и согласование
Программная реализация	Стандартные средства .NET	Необходимость установки сторонней библиотеки
Надежность соединения	Высокая (проводное соединение)	Зависит от помех и расстояния
Гибкость размещения	Ограничена кабелем	Высокая (беспроводное соединение)

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Оба рассмотренных метода связи (USB и Bluetooth) обеспечивают корректную передачу управляющих команд между серверным модулем и микроконтроллером в системе КВЦ. USB демонстрирует незначительное преимущество в скорости и простоте реализации, что делает его предпочтительным выбором в условиях стационарного размещения оборудования. В то же время Bluetooth представляет ценность в сценариях, где требуется мобильность или невозможна прокладка проводов.

Таким образом, выбор технологии должен основываться на конкретных требованиях к системе: приоритете надежности и минимальной задержки — USB; при необходимости беспроводного соединения — Bluetooth.

Список источников

[1] *Технология USB*. URL: https://fumiko.ru/blog/gaydy/standarty-usb-i-raznitsa-mezhdu-nimi/ (дата обращения 20.10.2015).

[2] *Работа с Arduino из c# приложения*. URL: https://habr.com/ru/articles/275439/ (дата обращения 20.10.2015).

[3] *Технология Bluetooth*. URL: https://blog.skillfactory.ru/bluetooth-chto-eto-i-kak-rabotaet/ (дата обращения 20.10.2015).

[4] *Подключение Bluetooth модуля HC-05 к Arduino Uno*. URL: https://voltiq.ru/hc-05-arduino-uno-connection/ (дата обращения 20.10.2015).

[5] *Официальный репозиторий 32feet.NET*. URL: https://github.com/inthehand/32feet (accessed 20.10.2015).

Selection between wired and wireless communication of server module with microcontroller for high-frequency circuit switching system

Bolovinov Konstantin Maksimovich bolovinovkm@student.bmstu.ru
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yuryevich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This paper presents a study of two methods of organizing communication between a microcontroller and a server module as part of the development of a high-frequency circuit switching device (HFC) designed to control the RF path of a satellite antenna. Consider wired USB and Bluetooth wireless technology. The focus is on practical implementation, time characteristics of data transmission and comparison of hardware and software requirements. Experiments have shown that both approaches provide reliable command transmission, but USB demonstrates an advantage in speed and ease of integration.

Keywords: *microcontroller, USB, Bluetooth, RF circuit switching, serial communication, Arduino UNO, server module, time delays*

УДК 004.382.2/.934.2

Масштабируемая гибридная потоковая архитектура для энергоэффективного вывода трансформерных нейронных сетей на ПЛИС

Зобов Олег Валерьевич o.v.zobov@z-master.ru
SPIN-код: 7699-7709

ООО «Зетмастер», Москва, Россия

Рассмотрена масштабируемая гибридная потоковая архитектура для энергоэффективного вывода трансформерных нейронных сетей на программируемых логических интегральных схемах. Представлена мультипроцессорная организация с кольцевой межсоединительной сетью, в которой крупнозернистые вычислительные блоки соединяются в потоковые конвейеры под управлением специализированного планировщика. Показано, что для модели GPT Neo 355M с 8-битным квантованием достигнуты задержки генерации токена 6,72 мс (1 узел), 3,90 мс (2 узла) и 2,58 мс (4 узла). Сделаны выводы, что предложенная архитектура обеспечивает снижение задержки в 2,05 и 1,63 раза по сравнению с временными и пространственными ПЛИС-ускорителями соответственно при сопоставимых затратах ресурсов. Результаты можно применять для создания энергоэффективных аппаратных ускорителей вывода больших языковых моделей.

Ключевые слова: *трансформерные нейронные сети, ПЛИС, аппаратные ускорители, структурно-фиксированные ускорители, архитектура вычислительных систем*

Введение. В статье рассматривается задача снижения задержки и повышения энергоэффективности вывода трансформерных моделей, применяемых в системах обработки естественного языка и генерации кода [1, 2]. Авторегрессионный вывод включает стадии предзаполнения контекста (формирование кэша ключей и значений) и по токенного декодирования; последняя обладает выраженной последовательностью и приводит к недоиспользованию параллельных ресурсов при классической организации вычислений. Существующие ПЛИС подходы либо опираются на временное повторное использование вычислительных блоков с частыми обращениями к внешней памяти, либо реализуют пространственные конвейеры, использование которых падает на по токенном декодировании. Настоящая работа предлагает архитектуру, объединяющую сильные стороны обоих подходов и сохраняющую масштабируемость при использовании нескольких кристаллов.

Материалы и методы. Архитектура строится вокруг трех типов крупнозернистых вычислительных блоков, каждый из которых охватывает логически связанную группу операций и включен в общий потоковый конвейер. Планировщик управляет последовательностью активации и повторного использования этих блоков по мере прохождения токена через стадии вычислительного графа трансформера.

Организация данных и память. Весовые коэффициенты линейных преобразований и кеэш ключей/значений размещаются в памяти с высокой пропускной способностью (HBM). Доступ к банкам HBM осуществляют параллельные контроллеры прямого доступа к памяти (ПДП), закрепленные за соответствующими каналами. Для повышения эффективности обмена применяется пакетирование 8-битных данных и пакетные передачи; внутри узла обмен между блоками организуется через общие буферы и очереди FIFO. Такая организация разделяет по времени операции чтения/записи и вычисления, упрощает размещение и трассировку и позволяет повысить рабочую частоту.

Функциональные вычислительные блоки.

1. Ядро матричной обработки. Выполняет блочно матричные умножения для всех линейных преобразований (проекции запросов, ключей, значений и выходов, а также полносвязные слои). Архитектурно представляет собой массив умножителей накопителей, сгруппированных по числу каналов HBM; каждый набор связан со своим контроллером ПДП. Частичные суммы накапливаются и передаются в модуль смещения и масштабирования для последующего квантования результатов.

2. Ядро многоголового внимания. Содержит две независимые секции умножения накопления (для вычисления оценок внимания по ключам и для смешивания по значениям), а также узлы маски причинности и функции softmax. Применяется поголовная конвейеризация: вычисление softmax для предыдущей головы перекрывается формированием оценок внимания для текущей.

3. Ядро нормализации по слоям и остаточных связей. Размещено на критическом пути между линейными преобразованиями и узлом внимания и выполняется с перекрытии с матрической обработкой, тем самым сокращает долю неконвейеризуемых участков.

Планировщик реализован как конечный автомат, который, в зависимости от текущей стадии обработки, активирует соответствующее ядро и организует повторное задействование крупных вычислительных блоков. В отличие от мелкозернистого каскада пространственных операторов, такой подход повышает пиковую утилизацию логики при каждом срабатывании и уменьшает число циклов «чтение — обработка — запись» через память с высокой пропускной способностью, характерных для чисто временных схем.

Мультипроцессорная организация и межсоединения. Система реализуется как мультипроцессорная архитектура, в которой отдельные ПЛИС выступают вычислительными узлами, соединенными кольцевой межсоединительной сетью. Применяется модельный параллелизм: разбиение весов линейных слоев по выходному измерению (каждый узел формирует свою долю выходного вектора), а кеша ключей/значений — по головам внимания. Хост-система подает на все узлы одинаковые входные эмбеддинги; сборка полного результата выполняется посредством обмена подпакетами по кольцу. Передачи по сети перекрываются текущими вычислениями: в блочно

матричных умножениях обмен результатами предыдущего блока скрывается под расчетом текущего блока, а явные накладные расходы проявляются только на границах крупных задач. Для сопоставления с имеющимися ПЛИС реализациями учитывались как «временные», так и «пространственные» архитектуры.

Квантование. Применяется постобучающее квантование с 8-битными весами и 8 битными активациями (масштабы и смещения подбираются по статистике активаций) без дополнительного обучения модели. Такой подход снижает нагрузку на подсистему памяти и умножители накопители при контролируемом снижении точности [3].

Аппаратная реализация. Развязка стадий через очереди FIFO, локализация обменов и привязка контроллеров ПДП к каналам памяти с высокой пропускной способностью позволили достичь рабочей частоты порядка 285 МГц на плате AMD Xilinx Alveo U50 (две сверхлогические области (SLR); по одному вычислительному узлу на SLR). Проектирование выполнено в Vitis HLS с последующим синтезом в Vivado; модель — GPT Neo 355M (открытая реализация) [2, 4, 5].

Результаты. Оценка проводилась моделированием с точностью до такта с учетом полосы каналов памяти с высокой пропускной способностью и пропускной способности межсоединений. Для модели GPT Neo 355M с постобученным квантованием (8 битные веса и 8 битные активации) получены: — задержка генерации токена: 6,72 мс (1 узел), 3,90 мс (2 узла на одной ПЛИС), 2,58 мс (4 узла на двух ПЛИС); — пропускная способность: 149,3 токен/с (1 узел), 257,1 токен/с (2 узла; ускорение в 1,72 раза относительно 1 узла), 388,5 токен/с (4 узла; ускорение в 1,51 раза относительно 2 узлов).

Сравнение с ускорителями на ПЛИС. Для сопоставления использованы представитель «временной» архитектуры с командно-управляемыми вычислительными ядрами и межкристальной кооперацией и представитель «пространственной» архитектуры на основе систолических массивов [6, 7]. В нормированных метриках предлагаемая архитектура обеспечивает: — 2 узла (1 ПЛИС): уменьшение задержки на токен в 1,41 раза относительно «временной» архитектурой и в 1,08 раза относительно «пространственной»; — 4 узла (2 ПЛИС): уменьшение задержки на токен в 2,05 и 1,63 раз соответственно, при умеренном потреблении аппаратных ресурсов.

Обсуждение полученных результатов. Выигрыш над «временными» реализациями объясняется уменьшением числа обращений к памяти с высокой пропускной способностью за счет укрупнения стадий в крупные вычислительные блоки и их повторного использования под управлением планировщика, а также перекрытием нормализации и остаточных связей с матрическими операциями. Преимущество над «пространственными» архитектурами проявляется на по токенном декодировании: вместо простоя множества конвейерных стадий выполняется повторное задействование насыщенного блока матричной обработки, а поголовная конвейеризация внимания скрывает часть затрат функции softmax и доступа к кешу значений.

Сублинейная масштабируемость (переход от одного к двум узлам — ускорение в 1,72 раза; от двух к четырем — в 1,51 раза) обусловлена долей операций, ограниченно распараллеливаемых между узлами, и проявлением затрат на квантование и синхронизацию при малой гранулярности блоков; эти факторы уменьшаются при увеличении нагрузки на узел и масштабе модели [3, 8].

Заключение. Представлена гибридная потоковая архитектура, в которой крупнозернистые вычислительные блоки в составе конвейера и мультипроцессорная организация с узлами на отдельных ПЛИС обеспечивают уменьшение задержки по токенного декодирования и высокую энергоэффективность вывода трансформеров. Для открытой модели GPT Neo 355M достигнуты задержки 2,58–6,72 мс в диапазоне 1–4 узлов и получены выигрыши в 2,05 и 1,63 раза относительно «временных» и «пространственных» ПЛИС ускорителей. Перспективы включают поддержку более крупных языковых моделей, автоматизацию планирования конвейера и оптимизацию межсоединений в кольцевой сети.

Список источников

[1] Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, vol. 30, pp. 5998–6008.

[2] Black S., Gao L., Wang P., Leahy C., Biderman S., Hallahan E., Anthony Q., Phang J., Gao L., Chen X. *GPT Neo: Large Scale Autoregressive Language Modeling with Mesh TensorFlow.* URL: https://github.com/EleutherAI/gpt-neo (дата обращения 08.09.2025).

[3] Yao Z., Aminabadi R.Y., Zhang M., Wu X., Li C., He Y. ZeroQuant: Efficient and Affordable Post Training Quantization for Large Scale Transformers. *Arxiv:2206.01861*, 2022, 15 p.

[4] *Alveo U50 data center accelerator card: product brief.* URL: https://www.amd.com/en/products/accelerators/alveo/u50.html (accessed 08.09.2025).

[5] *Vitis high level synthesis user guide; vivado design suite documentation.* URL: https://docs.xilinx.com/ (accessed 08.09.2025).

[6] Hong S., Moon S., Kim J., Lee S., Kim M., Lee D., Kim J.Y. DFX: A Low latency Multi FPGA appliance for accelerating transformer based text generation. *Arxiv:2209.10797*, 2022, 14 p.

[7] Chen Y., Li T., Chen X., Cai Z., Su T. High Frequency Systolic array based transformer accelerator on field programmable gate arrays. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 4, art. no. 822. https://doi.org/10.3390/electronics12040822

[8] Wang Z., Huang H., Zhang J., Alonso G. Shuhai: Benchmarking High Bandwidth Memory on FPGAs. *IEEE 28th Annual International Symposium on Field Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*, 2020, pp. 111–119. https://doi.org/10.1109/FCCM48280.2020.00024

Scalable hybrid dataflow architecture for energy-efficient inference of transformer neural networks on FPGAs

Zobov Oleg Valerevich o.v.zobov@z-master.ru
SPIN-code: 7699-7709

LLC Zetmaster, Moscow, Russia

A scalable hybrid streaming architecture for energy-efficient inference of transformer neural networks on field-programmable gate arrays is considered. A multiprocessor organization with a ring interconnection network is presented, in which coarse-grained computational blocks are connected into streaming pipelines controlled by a specialized scheduler. It is shown that for the GPT Neo 355M model with 8-bit quantization, token generation latencies of 6.72 ms (1 node), 3.90 ms (2 nodes), and 2.58 ms (4 nodes) are achieved. It is concluded that the proposed architecture provides latency reduction by factors of 2.05 and 1.63 compared to temporal and spatial FPGA accelerators, respectively, with comparable resource costs. The results can be applied for creating energy-efficient hardware accelerators for large language model inference.

Keywords: *transformer neural networks, field-programmable gate arrays (FPGA), hardware accelerators, fixed-architecture accelerators, computing systems architecture*

УДК 004.055

Анализ ситуации симуляторов электрических цепей в образовательных учреждениях

Крысин Иван Александрович ivan@bmstu.ru
Власюк Демьян Максимович demianvlas@gmail.com

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены ключевые проблемы существующих симуляторов электрических цепей в образовательном процессе, включая высокий порог входа, ограниченную кроссплатформенность и недостаток встроенных заданий. Представлена система критериев оценки, проанализированы аналоги по группам: профессиональные, веб- и гибридные решения. Показано, что традиционные методы без симуляторов приводят к цикличности, усталости преподавателей и снижению качества обучения из-за плотного взаимодействия и нагрузки на класс. Сделаны выводы, что оптимальный образовательный симулятор должен обеспечивать минимальный порог входа, визуализацию токов/напряжений, фокус на законах Ома и Кирхгофа, автономность, кроссплатформенность и автоматическую проверку задач.

Ключевые слова: *симуляторы электрических цепей, образование, эффективность обучения, визуализация, кроссплатформенность, порог входа, геймификация, Godot, SpiceSharp, C#*

Главная цель работы — выявить ключевые проблемы существующих симуляторов электрических цепей в образовательном процессе и предложить систему критериев для их оценки и разработки. При выполнении работы будет проанализирована предметная область, определены требования к симуляторам, проведен анализ аналогов и сформированы рекомендации для создания образовательных инструментов.

Основная значимость данной работы заключается в формировании универсальной системы критериев, которая позволит повысить эффективность обучения электротехнике в средних образовательных учреждениях. Система будет ориентирована на преодоление недостатков традиционных методов, таких как отсутствие наглядности, высокая нагрузка на преподавателей и сложности с лабораторным оборудованием. Также она позволит оптимизировать процессы обучения, делая их более интерактивными и доступными в режиме реального времени или самостоятельной работы.

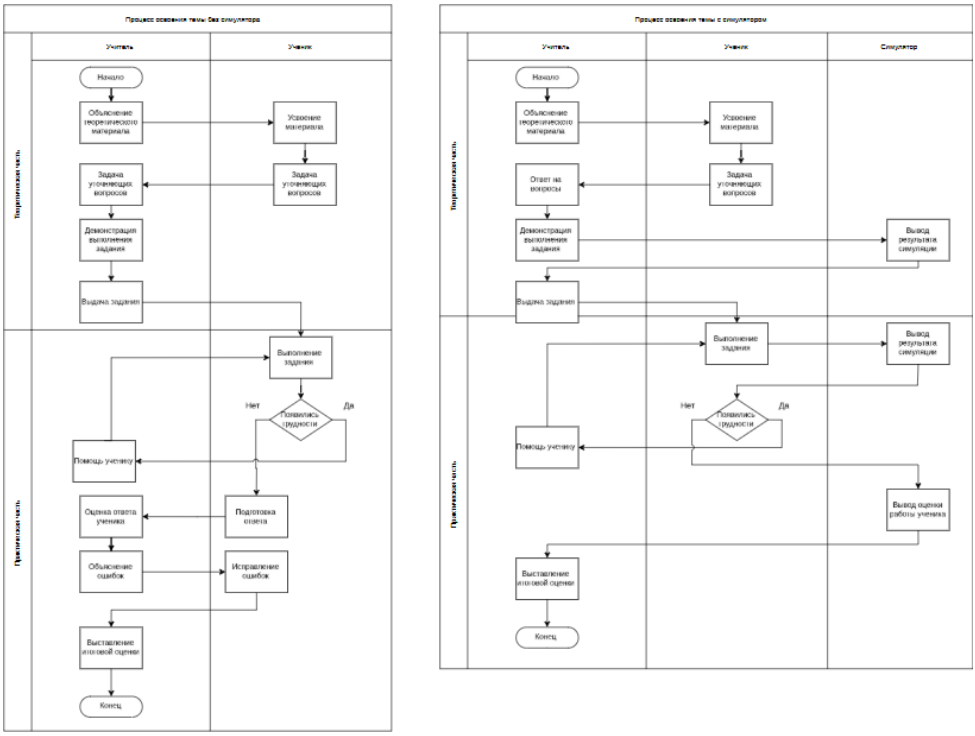
Результатом работы будет система требований к образовательным симуляторам, которая может быть использована для разработки, оценки и отбора программных средств в области электротехники и физики, но не ограничивается ими.

Одной из ключевых задач, решаемых такими симуляторами, является обеспечение наглядности и точности моделирования электрических процессов, включая расчеты по законам Ома и Кирхгофа, визуализацию токов

и напряжений, а также прогнозирование поведения цепей. Важно отметить, что такие инструменты широко используются не только в школьном образовании, но и в профессиональной среде, где они помогают избежать физических прототипов [1, 2].

На рисунке показаны схемы освоения темы без симулятора и с ним. Без симулятора: учитель и ученик проводят теорию, затем практику с цикличным выполнением заданий и плотным взаимодействием. При нескольких учениках качество падает — учитель устает, не успевает с каждым, что демотивирует учеников и влияет на отношение к предмету [3].

В случае освоения темы с симулятором, он берет на себя работу по просчетам и отслеживанию ошибок в решении ученика, позволяя сконцентрироваться на освоении материала и понимании принципов построения электрических цепей.



Сравнение процесса освоения темы с и без симулятора

Были выделены следующие критерии оценки существующих решений:

– порог входа: этот критерий характеризует степень интуитивной понятности и легкости начала работы с приложением для пользователей, не обладающих предварительным опытом;

– поддерживаемые операционные системы: этот параметр определяет степень кроссплатформенности;

– сложность симуляции: этот критерий отражает возможности в моделировании систем, включая количество элементов и типы анализов;

– потенциал интегрирования в образовательную программу: комплексный критерий, включающий простоту установки, стоимость и наличие учебных заданий [4].

Проведя анализ существующих решений, можно выделить три основные группы программ для моделирования электрических цепей, каждая из которых имеет четкую целевую аудиторию и сферу применения [5].

Профессиональные среды симуляции предлагают мощный функционал для моделирования сложных цепей, но имеют высокий порог входа, ограниченную поддержку ОС и сложны для интеграции в школьный процесс из-за избыточности функций.

Веб-приложения, напротив, идеальны для начинающих благодаря низкому порогу входа и интуитивному интерфейсу. Однако их использование в образовании ограничивается отсутствием встроенных руководств, необходимостью постоянного подключения к интернету и часто — требованием школьной лицензии.

Гибридные решения занимают промежуточное положение, предлагая сбалансированный функционал. Их главный недостаток для формального образования — отсутствие продуманной системы заданий и контроля прогресса учащихся.

Вышеописанные случаи, конечно, можно интегрировать в существующий учебный процесс, но для полноценного упрощения учебного процесса с малыми затратами сил участников обучающего процесса, симулятор должен иметь:

– минимизированный порог входа для быстрого освоения без предварительной подготовки;

– высокую визуальную наглядность процессов, включая отображение токов и напряжений, что усиливает дидактический эффект;

– адекватный набор компонентов, сфокусированный на фундаментальных законах и исключающий избыточные профессиональные элементы;

– кроссплатформенность и низкую ресурсоемкость для обеспечения доступности на стандартном и доступном оборудовании;

– надежность и автономность работы без зависимости от интернет-соединения, что критически важно для непрерывности учебного процесса;

– иметь систему встроенных задач с автоматической проверкой решений.

Список источников

[1] Козлова Е.В. *Использование симуляторов электрических цепей на уроках технологии.* URL: https://infourok.ru/ispolzovanie-simulyatorov-elektricheskih-cepey-na-urokah-tehnologii-3749402.html (дата обращения 28.10.2025).

[2] Jong T., Linn M., Zacharia Z. Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, 2013, vol. 340, pp. 305–308. https://doi.org/10.1126/science.1230579

[3] Дудырев Ф.Ф., Максименкова О.В. Учебные симуляторы в системе профессионального образования: педагогический аспект. *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Педагогика и психология*, 2020, № 2(36), с. 112–125.

[4] Сениченков Ю.Б. Виртуальные лаборатории: использование, разработка, стандартизация. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2022, № 3, с. 108–130. https://doi.org/10.32603/2071-2340-2022-3-108-132

[5] Новиков А.А., Бакурин М.Г., Мешков А.Ю. Анализ программ моделирования электрических схем и цепей для использования в учебных целях. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*, 2014, т. 13, № 4, с. 45–52.

Analysis of the situation of electrical circuit simulators in educational institutions

Krysin Ivan Alexandrovich ivan@bmstu.ru
Vlasyuk Demyan Maksimovich demianvlas@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The key problems of existing simulators of electrical circuits in the educational process are considered, including a high entry threshold, limited cross-platform and lack of built-in tasks. A system of evaluation criteria is presented, analogues are analyzed by groups: professional, web and hybrid solutions. Traditional methods without simulators have been shown to lead to cyclical behavior, teacher fatigue, and reduced quality of instruction due to tight interaction and classroom load. It was concluded that the optimal educational simulator should provide a minimum entry threshold, visualization of currents/voltages, focus on Ohm and Kirchhoff laws, autonomy, cross-platform and automatic task verification.

Keywords: *electrical circuit simulators, education, learning efficiency, visualization, cross-platform, entry threshold, gamification, Godot, SpiceSharp, C#*

УДК 004.057.6

Обзор и сравнительный анализ средств конвертации в архитектуре литературного портала

Жудова Анна Алексеевна zhudovaanna24@gmail.com
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Авторами проведен анализ и сравнение средств конвертации текстовых документов для веб-приложений литературных порталов. Рассмотрены популярные библиотеки и инструменты для преобразования файлов различных форматов в HTML-представление. На основе сравнительного анализа Mammoth.js, Pandoc и LibreOffice по ключевым критериям (скорость обработки, занимаемые ресурсы, поддерживаемые форматы) обоснован выбор инструментов для реализации. На примере разработанного портала показана эффективность интеграции связки Mammoth.js для DOCX и нативных методов Node.js для TXT в архитектуру приложения на базе Express.js.

Ключевые слова: *конвертация документов, литературный портал, Node.js, архитектура веб-приложений, обработка файлов, DOCX, TXT, Mammoth, Express.js*

Современные литературные порталы являются ключевыми платформами для публикации и потребления текстового контента. Одной из основных задач таких систем является обеспечение совместимости и единообразного отображения произведений, загружаемых пользователями в различных форматах (DOCX, TXT, PDF и др.). Средства конвертации документов в универсальный формат, пригодный для отображения в веб-браузере (такой как HTML), являются критически важным компонентом архитектуры подобных порталов. Их применение позволяет абстрагироваться от исходного формата документа, обеспечивая кроссплатформенность, адаптивность и единообразие визуального представления текста для конечного читателя [1].

Сфера применения и актуальность средств конвертации выходит за рамки простого преобразования форматов. В контексте литературного портала они решают задачи: авторы могут загружать произведения в привычных форматах без необходимости ручного копирования текста в веб-редактор; контент автоматически подготавливается к публикации, что исключает человеческий фактор и ускоряет процесс; конвертированный текст интегрируется в стандартные шаблоны сайта, обеспечивая единообразие оформления для всех произведений.

Актуальность данного направления обусловлена растущими требованиями пользователей к простоте публикации контента и необходимостью масштабируемой автоматизации процессов его обработки на стороне сервера.

Цель исследования — провести сравнительный анализ средств конвертации документов для литературных порталов, обосновать выбор технологии для реализации и оценить ее эффективность в рамках разработанного прототипа веб-приложения.

Для решения задачи конвертации в экосистеме Node.js существует ряд библиотек и подходов, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

Специализированные библиотеки для DOCX. Библиотека Mammoth.js [2] предназначена для преобразования DOCX в HTML. Она работает непосредственно в среде Node.js, не требуя внешних зависимостей, и использует для извлечения стилей и текста преобразование документа, аналогичное XSLT. Officegen предоставляет более широкий API, включая создание документов, но обладает избыточной сложностью для задач чтения. Связка Pizzip (для распаковки DOCX, который является ZIP-архивом) и Docxtemplater предлагает мощные возможности шаблонизации, однако для простой конвертации требует больше вычислительных ресурсов.

Pandoc [3] — это кроссплатформенное приложение, поддерживающее конвертацию между десятками форматов. Его интеграция в Node.js-приложение осуществляется через вызов внешнего процесса (child_process), что добавляет накладные расходы и сложности при развертывании, но предоставляет беспрецедентную гибкость. LibreOffice в headless-режиме также может использоваться для пакетной конвертации документов через командную строку, являясь промышленным решением, но требующим установки тяжеловесного ПО на сервер.

Для обоснования выбора инструментов конвертации был проведен сравнительный анализ трех подходов: Mammoth.js, Pandoc и LibreOffice (headless-mode) (см. таблицу).

Mammoth.js оказался оптимальным решением по совокупности критериев. Несмотря на то, что он не сохраняет сложное форматирование, его скорость работы является наивысшей. Будучи чистой JavaScript-библиотекой, он идеально интегрируется в стек Node.js/Express.js, не требуя внешних зависимостей.

Для литературного портала, где приоритетами являются скорость публикации и простота архитектуры, выбор связки Mammoth.js для DOCX и нативных методов Node.js для TXT [4] является технически обоснованным.

Для разрабатываемого литературного портала был выбран подход, основанный на комбинации Mammoth.js для конвертации DOCX-файлов и нативных методов Node.js (модуль fs/Buffer) для обработки TXT-файлов. Данный выбор обоснован следующими факторами; Mammoth.js — чистая JavaScript-библиотека, не требующая внешних зависимостей; легко встраивается в существующий Express.js-стек; работает в памяти процесса без накладных расходов на запуск внешних приложений.

Принцип работы Mammoth.js заключается в следующем (рис. 1). Исходный DOCX-файл, представляющий собой ZIP-архив, первоначально распако-

вывается в памяти. Затем из полученного архива извлекается ключевой XML-файл (document.xml), который содержит весь текст документа и информацию о применяемых стилях. На следующем этапе к извлеченному XML-дереву применяется набор предустановленных и пользовательских правил преобразования, аналогичный XSLT-трансформации. Финальным шагом на основе этих правил генерируется результирующее HTML-дерево либо извлекается сырой текст для дальнейшего использования.

Сравнительный анализ средств конвертации

Критерий	Mammoth.js	Pandoc	LibreOffice
Время обработки файла (100 КБ), мс	±250	±850	±3000
Занимаемое место	4,8 МБ	415 МБ	1,4 ГБ
Поддерживаемые форматы файлов	DOCX, TXT	DOCX, PDF, EPUB, MD	DOC, DOCX, ODT, RTF
Поддерживаемые элементы в файлах	Текст, стили	Текст, стили, таблицы	Текст, стили, таблицы, изображения
Время конвертации 10 файлов подряд, с	±15	±35	±150
Сохранение структуры 10 файлов	98 % (9/10)	100 % (10/10)	100 % (10/10)

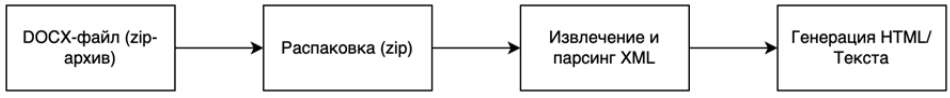


Рис. 1. Принцип работы Mammoth.js

Рис. 2 демонстрирует интерфейс загрузки произведений на литературный портал. Пользователь имеет возможность выбора файла в формате DOCX или TXT через стандартный диалог выбора файлов. После выбора файла система автоматически определяет его тип и запускает соответствующий процесс конвертации.

На рис. 3 представлен результат успешной конвертации и отображения загруженного документа. Текст произведения равномерно форматируется в соответствии с единым стилем портала, обеспечивая комфортное чтение. Независимо от исходного формата файла (DOCX или TXT), конечное представление сохраняет целостность содержимого и адаптируется под различные устройства просмотра.

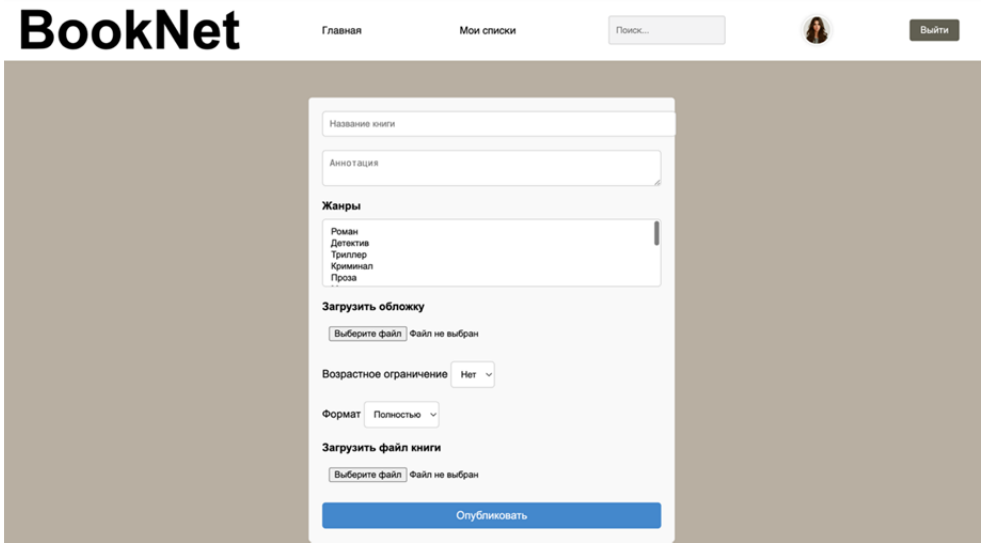


Рис. 2. Страница с предоставлением загрузки файла с текстом

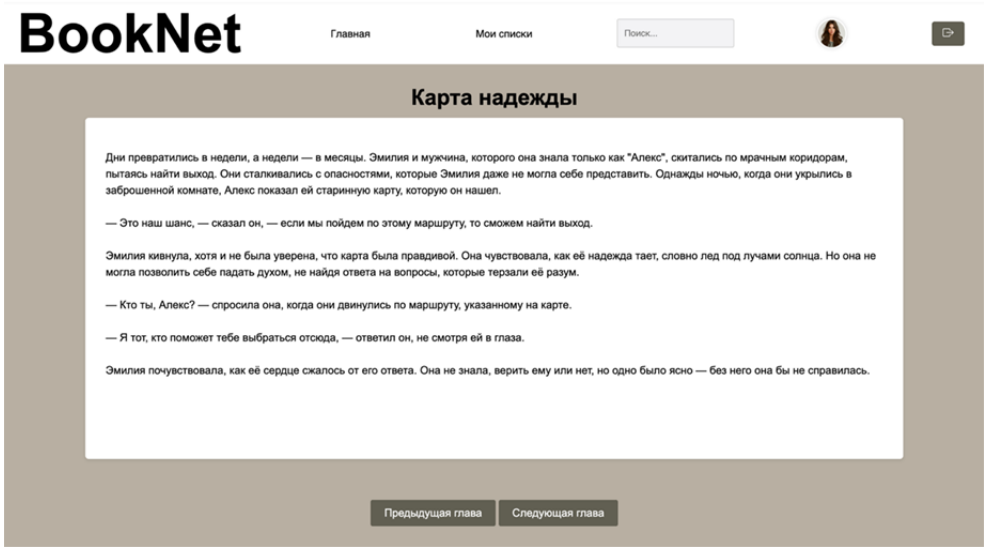


Рис. 3. Отображение загруженного текста из файла

Таким образом, авторами проведен анализ средств конвертации документов для литературных порталов. Выбранная комбинация инструментов оптимально соответствует требованиям проекта к поддерживаемым форматам и производительности.

Список источников

[1] Иванов С.П. *Современные подходы к кроссплатформенной разработке веб-приложений. Программные комплексы и информационные технологии в науке, образовании и промышленности*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2023, с. 45–62.

[2] *Official Documentation and API Reference*. URL: https://github.com/mwilliamson/mammoth.js (accessed 06.10.2025).

[3] *User's Guide*. URL: https://pandoc.org/MANUAL.html (accessed 06.10.2025).

[4] *Node.js v20 Guides -File System*. URL: https://nodejs.org/docs/latest/api/fs.html (accessed 06.10.2025).

Review and comparative analysis of conversion tools in the architecture of a literary portal

Zhudova Anna Alekseevna zhudovaanna24@gmail.com
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yuryevich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The authors have analyzed and compared text document conversion tools for literary portal web applications. They have reviewed popular libraries and tools for converting files of various formats into HTML representation. Using the example of a implemented literary portal, they have analyzed the practical aspects of integrating conversion systems into the architecture of a Node.js application.

Keywords: *document conversion, literary portal, Node.js, web application architecture, file processing, DOCX, TXT, Mammoth, Express.js*

УДК 004.5

UX/UI анализ интерфейса веб-приложения для организации учебного процесса репетитора

Зубкова Алена Владимировна zubkovaav@student.bmstu.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Федоров Виктор Олегович fedorov_vo@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Проведен обзор методов UX/UI анализа для оценки интерфейса веб-приложения, предназначенного для организации учебного процесса репетиторами. В процессе обзора выбраны методы юзабилити-тестирования и анализа пользовательского пути. На основе этих методов проведен анализ интерфейса приложения и выявлены проблемные зоны интерфейса, оказывающие влияние на эффективность работы сценария. Сформулированы конкретные рекомендации по улучшению удобства и функциональности интерфейса. Практическая значимость исследования заключается в поиске подходов анализа пользовательского интерфейса и применении их на примере веб-приложения.

Ключевые слова: *пользовательский опыт (UX), пользовательский интерфейс (UI), юзабилити-тестирование, веб-приложение, человеко-компьютерное взаимодействие (HCI), пользовательский путь (User Journey)*

На сегодняшний день множество людей взаимодействует с цифровыми интерфейсами, такими как мобильные приложения или веб-сайты, и получаемый пользовательский опыт (UX) напрямую зависит от интуитивности и понятности пользовательского интерфейса (UI). Дизайнеры на всех этапах разработки конечного продукта применяют UX/UI-анализ, который позволяет выявлять проблемные моменты на основе объективных данных для дальнейшего улучшения интерфейса [1].

Целью работы является разработать и проанализировать прототип интерфейса информационной системы для организации учебного процесса репетитора на основе UX/UI подходов.

Методы анализа условно делятся на качественные и количественные. Их выбор зависит от целей проекта и стадии его реализации, будь то анализ начального интерфейса, прототипа или готового продукта.

Существует множество методов, которые разделяются на две группы. К качественным методам [1] относятся эвристическая оценка, юзабилити-тестирование, анализ карт пользовательского пути и опрос SUMI. К количественным методам [2] принадлежат A/B-тестирование, многовариантное тестирование, а также мониторинг логов и аналитики.

Выбор методов UX/UI анализа зависит от стадии разработки. На этапе проектирования для поиска проблем до написания кода эффективны эвристи-

ческая оценка и анализ пользовательского пути. Когда готов рабочий прототип, ключевыми методами становятся юзабилити-тестирование с использованием опроса SUMI [3], результаты которых позволяют выявить проблемные части интерфейса и изменить карту пользовательского пути. После запуска приложения фокус смещается на количественные методы: анализ аналитики для выявления проблем и A/B-тестирование для их проверки.

В качестве анализа прототипа интерфейса создаваемого веб-приложения авторов, с учетом его этапа разработки, воспользуемся следующими методами: анализ карт пользовательского пути и анализ опросника SUMI.

Для примера анализа возьмем сценарий добавления нового занятия с домашним занятием на курсе. Для начала необходимо составить карту пользовательского пути (рис. 1).

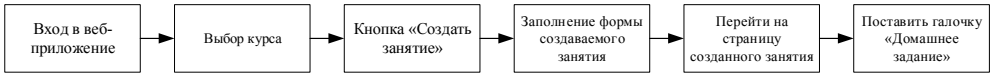


Рис. 1. Карта пользовательского пути выбранного сценария

На основе созданной карты пользовательского пути нужно сделать прототипы страниц, являющиеся целью анализа. Прототипы будем создавать с помощью сервиса Tilda [4]. Для начала страница «Мои курсы» (рис. 2), на которой будет расположен список курсов пользователя. На этой странице при нажатии на выбранный курс будет открываться страница «Информация о курсе», где можно будет увидеть описание курса, «Преподавателей» и «Занятия», а если пользователь будет играть роль «Репетитор», ему доступна кнопка «Создать занятие», нажав на которую откроется форма «Создание нового занятия» (рис. 3). После заполнения формы перейти на страницу созданного занятия (рис. 4) и нажать на галочку «Домашнее задание», которая доступна только для репетитора.

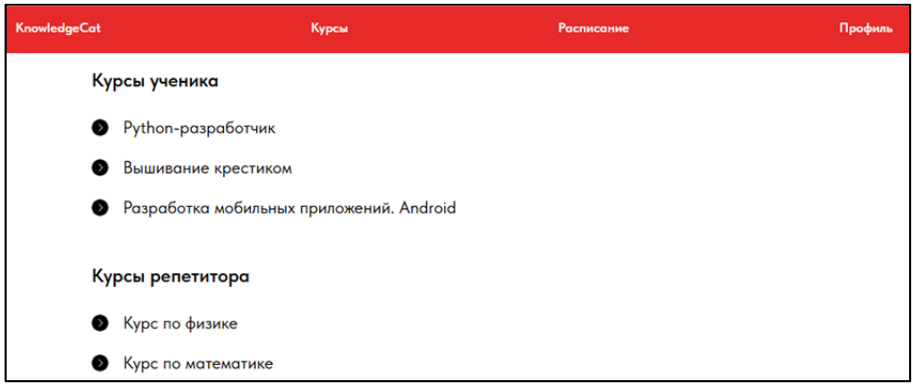


Рис. 2. Прототип страницы «Мои курсы»

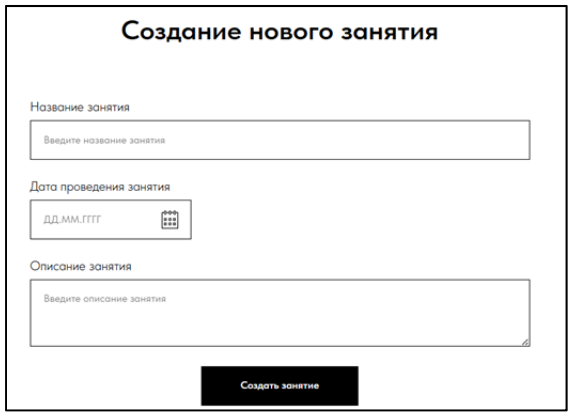


Рис. 3. Прототип формы «Создание нового занятия»

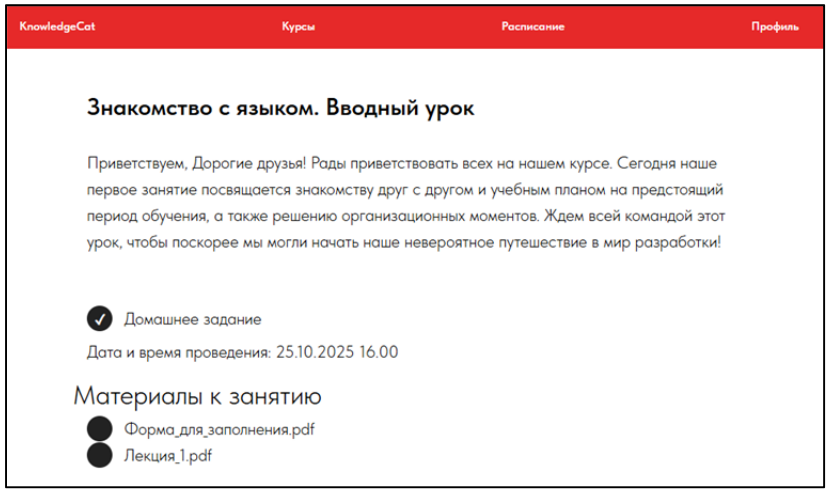


Рис. 4. Прототип страницы «Занятие»

Чтобы оценить юзабилити прототипа интерфейса, необходимо найти испытуемых репетиторов по следующим критериям выбора: опыт работы в сфере более 3 лет, разнообразие направлений обучения, а также необязательный опыт взаимодействия с аналогами тестируемого приложения. Поиск испытуемых проводился в социальных сетях и сервисах-агрегаторах услуг. Были выбраны пять испытуемых, на правах анонимности их имена были изменены.

1. Анна, 26 лет, работает 5 лет репетитором по русскому языку в Калуге. Ранее использовала сервис GetCourse.

2. Вячеслав, 28 лет, работает 7 лет репетитором по сольфеджио в Калужской области. Ранее не пользовался сервисами.

3. Павел, 34 года, работает 12 лет репетитором по юриспруденции в Калуге и Московской области. Ранее использовал сервис iSpring Learn.

4. Ксения, 27 лет, работает 4 года репетитором по вокалу в Москве. Ранее использовала сервис GetCourse.

5. Теймур, 28 лет, работает 6 лет репетитором по химии и биологии в Калуге. Ранее не пользовался сервисами.

Результаты опроса

Проблема	Анна	Вячеслав	Павел	Ксения	Теймур
1. Оцените общее впечатление от интерфейса (от 0 до 10)	8	7	7	9	6
2. Насколько понятной показалась общая структура и навигация в системе? (от 0 до 10)	8	7	6	8	6
3. Насколько процесс пути по сценарию соответствовал вашим ожиданиям? (от 0 до 10)	8	6	7	8	6
4. Насколько легко было найти функцию создания нового занятия? (от 0 до 10)	8	7	8	9	7
5. Столкнулись ли вы с какими-то трудностями или неясностями при заполнении формы создания занятия? (+/-)	–	+	+	+	+
6. Если предыдущем вопросе «+», то опишите, что именно вызвало затруднение? (Описать кратко)	–	В форме нет возможности сразу объявить ДЗ	После нажатия кнопки «Создать занятие» нет перехода на новое занятие	Нет галочки для установки ДЗ	Нельзя сразу указать ДЗ
7. Насколько удобным и очевидным вам показался процесс назначения домашнего задания к занятию? (от 0 до 10)	7	7	6	7	6

Окончание таблицы

Проблема	Анна	Вячеслав	Павел	Ксения	Теймур
8. Как вы оцениваете количество шагов, которые потребовалось сделать для полного прохождения сценария? (от 0 до 10)	7	6	7	7	6
9. Чувствовали ли вы уверенность в том, что действия приводят к нужному результату? (+/-)	+	–	–	+	–
10. Что бы вы в первую очередь изменили или улучшили в интерфейсе на основе своего опыта? (Описать кратко)	Сделать возможность создания занятия через расписание	Добавить в форме возможность объявления ДЗ	Создание занятия через страницу с расписанием и возможность добавления ДЗ в форме	Упростить возможность установки ДЗ	Сразу в форме сделать возможность указания ДЗ

По итогам опроса выявлены критические проблемы в основном рабочем сценарии репетитора. Большинство участников столкнулись с принципиальными сложностями: невозможностью добавить домашнее задание непосредственно при создании занятия и неочевидностью самого механизма его указания. Это свидетельствует о различии между логикой интерфейса и ожиданиями пользователей. Некоторые репетиторы отметили отсутствие создания занятия из расписания, отсутствие поиска курса и многошаговость процесса, что снижает интуитивность интерфейса, заставляя делать больше шагов для простых задач.

Таким образом, текущая версия прототипа не готова к дальнейшей разработке. Начать нужно с того, что необходимо изменить ранее созданную карту пользовательского пути (рис. 5), где необходимо добавить возможность добавлять новое занятие из страницы «Расписание» (рис. 6). Также необходимо добавить возможность поиска курса на странице со списком всех курсов пользователя (рис. 7). Кроме этого необходимо изменить форму «Создание нового занятия», чтобы можно заранее выбрать «Домашнее задание» на создаваемом занятии, а также добавить возможность выбора курса, если занятие создается из страницы «Расписание» (рис. 8).

Вход в веб-приложение	Выбор курса	Кнопка «Создать занятие»	Заполнение формы создаваемого занятия
	Кнопка «Расписание»		

Рис. 5. Измененная карта пользовательского пути выбранного сценария



Рис. 6. Прототип страницы «Расписание»

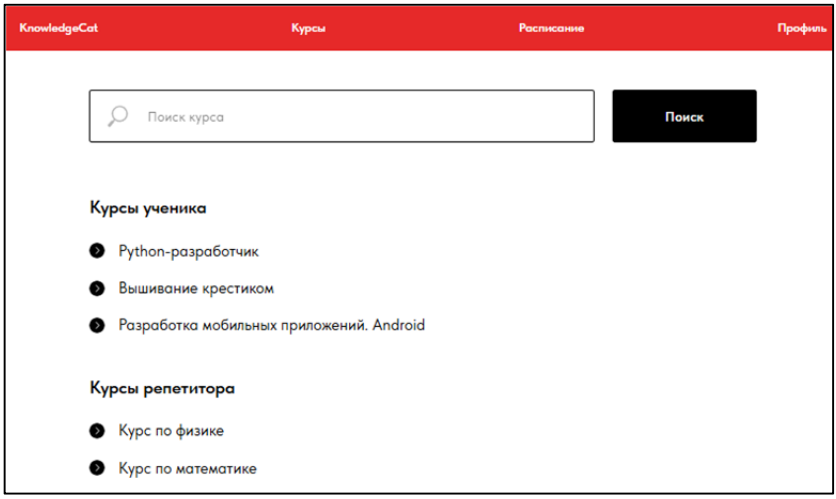


Рис. 7. Измененный прототип страницы «Мои курсы»

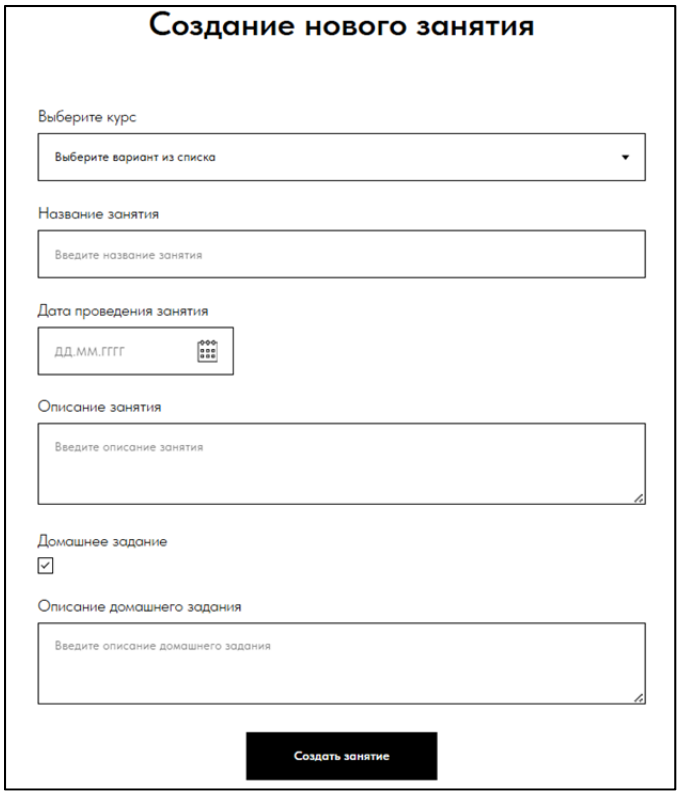


Рис. 8. Измененная форма «Создание нового занятия»

Подводя итоги по выполненному исследованию, можно сделать вывод, что рассмотренные методы помогли в выявлении, а также систематизации ключевых проблем прототипирования интерфейса, а именно неочевидность ключевых функций и отсутствие альтернативных сценариев. Выявленные после опроса репетиторов проблемы послужили изменению карты пользовательского пути, а также добавлению новых возможностей в уже существующих шагах. Таким образом, исследование подтверждает, что рассмотренные методы на основе объективных данных на стадии прототипирования являются необходимым условием для создания интуитивно понятного интерфейса, отвечающего реальным потребностям пользователей.

Список источников

[1] *Тестирование интерфейса пользователя (UI)*. URL: https://tquality.ru/blog/testirovanie-polzovatelskogo-interfejsa/ (дата обращения 22.10.2025).

[2] *Тестирование пользовательского интерфейса: стандарты, чек-лист и шаги.* URL: https://wezom.com.ua/blog/testing-ui-user-interface (дата обращения 22.10.2025).

[3] *Usability Evaluation of PS Using SUMI (Software Usability Measurement Inventory.* URL: https://www.academia.edu/15066476/Usability_Evaluation_of_PS_Using_SUMI_Software_Usability_Measurement_Inventory/ (accessed 25.10.2025).

[4] Федоров В.О., Шилкина М.С. Использование no/low-code сервисов для тестирования продуктовых гипотез. *Оригинальные исследования (ОРИС)*, 2022, т. 12, № 3, с. 70–76.

UX/UI analysis of the web application interface for organizing the tutor's learning process

Zubkova Alyona Vladimirovna zubkovaav@student.bmstu.ru
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Fedorov Viktor Olegovich fedorov_vo@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yuryevich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper provides an overview of UX/UI analysis methods for evaluating the interface of a web application designed to organize the learning process by tutors. During the review process, the methods of usability testing and user path analysis were selected. Based on these methods, the application interface was analyzed and interface problem areas were identified that affect the effectiveness of the script. Specific recommendations have been formulated to improve the convenience and functionality of the interface. The practical significance of the research lies in finding the best approaches to analyzing the user interface and applying them to the example of a web application.

Keywords: *user experience (UX), user interface (UI), usability testing, web application, human-computer interaction (HCI), user journey*

УДК 004

Обзор ML-алгоритмов на предмет выявления возможности использования в системах прогнозирования цен на недвижимость

Ткаченко Анастасия Владимировна tkachenko_av@bmstu.ru
Гулимова Вера Николаевна gulimovavn@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены алгоритмы машинного обучения, применяемые для прогнозирования цен на недвижимость. Представлены их основные характеристики, преимущества и ограничения, а также критерии выбора алгоритма в зависимости от объема данных и сложности признаков. Показано, что ансамблевые методы обеспечивают оптимальный баланс между точностью и устойчивостью, нейронные сети позволяют моделировать сложные нелинейные зависимости, а линейные модели остаются полезными как базовые. Сделаны выводы, что выбор подхода определяется доступностью данных и требованиями к объяснимости модели. Результаты могут быть использованы для разработки интеллектуальных систем оценки и прогнозирования стоимости объектов недвижимости.

Ключевые слова: *недвижимость, прогнозирование, машинное обучение, регрессия, ансамбли, нейронные сети*

Прогнозирование цен на недвижимость — задача, имеющая важное прикладное значение. Оно используется в массовой оценке (mass appraisal), инвестиционном анализе, управлении рисками, банковском кредитовании и др. При этом точность прогноза зависит не только от качества данных и признаков, но и от выбора алгоритма моделирования. Рынок недвижимости отличается рядом сложностей: пространственная неоднородность, сильная корреляция признаков (локация, инфраструктура, характеристики дома), сегментация рынков (разные классы, районы), а также наличие внешнеэкономических факторов и эффектов трендов.

Цель данного обзора — рассмотреть классические алгоритмы машинного обучения и смежные подходы с точки зрения их пригодности к прогнозированию цен на недвижимость, выявить сильные/слабые стороны, критерии выбора и основные уязвимые места.

Линейная регрессия и ее расширения:

– классическая линейная регрессия — популярный стартовый вариант. В публикации «Прогнозирование стоимости жилья на основе модели линейной регрессии» рассматривается применение простейшего линейного регрессора на Python (Scikit-Learn) и демонстрируется ограниченная способность метода учитывать нелинейности и взаимодействия признаков [1];

– регуляризованные регрессии (Ridge, Lasso, ElasticNet) часто применяются для борьбы с мультиколлинеарностью и переобучением. Общий обзор алгоритмов регрессии в статье «Алгоритмы машинного обучения для регрес-

сионного анализа и прогнозирования числовых данных» подробно рассматривает регуляризацию и выбор регрессоров [2];

– эконометрические регрессии с временным компонентом (например, модели AR, ARIMA, регрессия с лагами) также применяются в исследованиях недвижимости. В статье «Временной анализ эконометрических моделей ценообразования на рынке жилья» проанализированы такие модели на примере однокомнатных квартир города Саратова, с акцентом на динамику коэффициентов моделей и сегментацию рынка [3].

Деревья решений и ансамбли. Дерево решений (Decision Tree) — базовый нелинейный метод, который естественно обрабатывает нелинейные зависимости и взаимодействия. Однако одиночное дерево часто нестабильно и склонно к переобучению. Ансамбли на основе деревьев — наиболее популярный класс моделей для задачи прогнозирования цен на недвижимость:

– Random Forest — агрегирует множество деревьев, снижая переобучение и улучшая обобщающую способность;

– Gradient Boosting (в том числе XGBoost, LightGBM, CatBoost) — строят последовательность деревьев, где каждый следующий корректирует ошибки предыдущих.

В статье [4] была поставлена задача прогнозирования ценового индекса и как один из конкурирующих методов рассматривался бустинг/ансамбли деревьев. Также в публикации [5] метод бустинга используется совместно с обработкой текстовых признаков (например, описания объявлений)

Нейронные сети и глубокое обучение. Нейросети позволяют строить очень гибкие модели, особенно в задачах с большим количеством признаков, взаимодействий и структурированных данных (например, пространственные данные, изображения, тексты). В статье [5] показано, как нейросети использованы совместно с обработкой текстовой информации

Гибридные и ансамблевые подходы. В исследованиях часто применяют комбинации моделей — stacking, blending, усреднение результатов нескольких моделей, а также метамодели. Такой подход позволяет объединить преимущества различных алгоритмов и снизить ошибку прогнозирования. В задачах оценки стоимости недвижимости ансамбли могут включать линейные, бустинговые и нейросетевые модели.

Сравнительная характеристика основных алгоритмов машинного обучения, применяемых для прогнозирования цен на недвижимость, представлена в табл. 1.

При выборе алгоритма стоит ориентироваться на следующие факторы.

1. Объем данных и размерность — при большой выборке и множестве признаков алгоритмы с высокой вычислительной сложностью могут быть непрактичны.

2. Скорость обучения и предсказания — важна при оперативных системах.

3. Интерпретируемость — иногда требуется объясняемость модели (особенно в оценочных и административных сценариях).

4. Устойчивость к выбросам и шуму — рынок недвижимости может содержать аномалии и ошибки в данных.

5. Неоднородность (геопространственная структура) — часто данные распределены по регионам, вводятся пространственные признаки, расстояния, гео-признаки.

6. Обобщающая способность и переобучение — важна надежная схема кросс-валидации, регуляризация и подбор гиперпараметров.

Сравнительная характеристика алгоритмов машинного обучения для прогнозирования цен на недвижимость

Алгоритм/класс	Преимущества	Недостатки / риски	Когда применять / рекомендации
Линейная регрессия	Простота, быстрое обучение	Не учитывает нелинейности, чувствительна к мультиколлинеарности	Начальная проверка, базовая модель
Регуляризованные регрессии	Борьба с переобучением, стабильность	Требует настройки регуляризации	Когда много коррелирующих признаков
SVR / методы с ядрами	Способность моделировать нелинейности	Плохо масштабируется, сложность настройки	Средние объемы данных, умеренная размерность
Decision Tree	Интерпретируемость, нелинейность	Переобучение для простых деревьев	Быстрые модели, исследование признаков
Random Forest	Устойчивость к переобучению, работа с пропусками	Ограниченная гибкость в экстремальных случаях	Широко применяемый базовый ансамбль
Gradient Boosting	Высокая точность, настройка, важность признаков	Может переобучаться	В задачах ценообразования
Нейронные сети	Гибкость, моделирование сложных зависимостей	Требует много данных, настройка сложна	Если есть богатый и разнообразный набор признаков
Гибридные ансамбли	Сочетание сильных сторон разных моделей	Сложность реализации и интерпретации	Когда одна модель не дает достаточной точности

В контексте российской недвижимости важно учитывать сегментацию рынка (разные по классу районы, новостройки/вторичный рынок и др.), как это подчеркивается в работе [3], где сегментация по этажности влияет на коэффициенты модели Также в исследовании [6] анализируется выбор ключе-

вых факторов (удаленность от центра, инфраструктура) и влияние их на качество модели.

Проблемы и ограничения в применении алгоритмов к недвижимости:

– смещенные данные и неравномерное покрытие: в некоторых районах количество транзакций маленькое, что затрудняет построение модели;

– мультколлинеарность признаков: многие признаки (площадь, этажность, возраст дома) могут быть взаимосвязаны;

– эффекты пространственной автокорреляции: цены в соседних домах взаимозависимы — классические алгоритмы не учитывают геозависимости напрямую;

– выбросы и ошибки данных: человеческие ошибки в вводе, объявления с неправильной ценой — такие аномалии могут портить обучение;

– переобучение и утечка данных: нужно осторожно строить разбиение на обучающую/тестовую выборку, особенно с учетом времени и географии;

– интерпретируемость: сложные ансамбли или нейронные сети сложнее объяснить, что может быть проблемой в оценочных задачах.

В заключении стоит отметить, что в задаче прогнозирования цен на недвижимость ни один алгоритм не будет универсально лучшим — все зависит от объема и качества данных, состава признаков и требований к интерпретации. Линейные методы хороши как точка старта и контрольная модель. Ансамбли деревьев (Random Forest, Gradient Boosting) часто являются «рабочим решением» благодаря их балансу между гибкостью и устойчивостью. Методы с ядрами могут быть полезны при умеренном объеме данных, но ограничены в масштабировании. Нейронные сети открывают широкие возможности при наличии большого объема и разнообразия данных, особенно при интеграции текстов, изображений, геоданных. Гибридные подходы позволяют объединить сильные стороны разных методов.

Список источников

[1] Катковская К.В., Дудко А.Д. Прогнозирование стоимости недвижимости на основе модели линейной регрессии. *StudNet*, 2022, № 6, с. 5590–5603.

[2] Оксенчук Т.А. Алгоритмы машинного обучения для регрессионного анализа и прогнозирования числовых данных. *Вестник науки*, 2025, т. 4, № 6(87), с. 1273–1275.

[3] Харламов А.В., Захаров А.В. Временной анализ эконометрических моделей ценообразования на рынке жилья. *Финансы, денежное обращение и кредит*, 2019, № 3, с. 41–50.

[4] Никитина Н.С. Прогнозирование индекса цен на недвижимость в России. *Экономическое развитие России*, 2022, т. 29, № 6, с. 24–28.

[5] Николенко С.О. Прогнозирование стоимости недвижимости с использованием методов машинного обучения и анализа текстовых данных. *Прикладаная статистика и искусственный интеллект*, 2024, № 4, с. 1–20.

[6] Сальников В.А., Михеева О.М. Модели прогнозирования цен на московском рынке жилой недвижимости. *Проблемы прогнозирования*, 2018, № 1, с. 129–139.

Review ML algorithms for potential use in property price forecasting systems

Tkachenko Anastasia Vladimirovna tkachenko_av@bmstu.ru
Gulimova Vera Nikolaevna gulimovavn@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article discusses machine learning algorithms used for predicting real estate prices. It presents their main characteristics, advantages, and limitations, as well as criteria for selecting an algorithm based on the volume of data and the complexity of features. The article shows that ensemble methods provide an optimal balance between accuracy and stability, neural networks allow for modeling complex nonlinear relationships, and linear models remain useful as basic models. The article concludes that the choice of approach depends on the availability of data and the requirements for model explainability. The results can be used to develop intelligent systems for evaluating and predicting the value of real estate properties.

Keywords: *real estate, forecasting, machine learning, regression, ensembles, neural networks*

УДК 004.91

Автоматизированная система стенда контроля функционирования тахографа

Онуфриева Татьяна Александровна onufrievata@bmstu.ru
Баранов Владислав Андреевич baranovva@student.bmstu.ru
Мушкамбарян Давит Таронович mushkambaryandt@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема контроля функционирования тахографов на производстве, в частности проверка корректности работы подсветки lcd-экрана. Представлена автоматизированная система контроля, основанная на применении методов машинного зрения. Показано, что разработанный алгоритм, включающий этапы предобработки изображения, поиска цветовых пятен и сравнения с эталонными образцами, позволяет идентифицировать состояние подсветки экрана. Сделаны выводы, что предложенное решение позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, стандартизировать процесс и повысить его точность. Данная система применима для автоматизации контроля функционирования на производственных линиях, что обеспечивает снижение брака выпускаемой продукции.

Ключевые слова: *тахограф, машинное зрение, контроль функционирования, обработка изображений, надежность, производственный процесс, приемо-сдаточные испытания, алгоритм, человеческий фактор, брак, качество продукции, подсветка экрана*

В настоящее время обеспечение безопасности движения автомобиля — одна из важнейших проблем в автомобилестроении. Большинство разрабатываемых систем нацелены на снижение ущерба от аварийных ситуаций, будь то активные или пассивные системы [1]. Однако существуют такие системы, которые направлены на избежание самих аварийных ситуаций, например спровоцированных усталостью водителя или неисправностью автомобиля. Система отслеживания коммерческого транспорта — одна из них. Важной ее частью является тахограф.

Тахограф — бортовой регистратор, который автоматически регистрирует параметры состояния и движения транспортного средства, а также режим работы водителя.

Важным этапом в изготовлении тахографов, как и любых других сложных технических устройств, являются приемо-сдаточные испытания (ПСИ). Контроль функционирования является частью ПСИ и включает детальные проверки работоспособности, безопасности и эксплуатационных характеристик оборудования с составлением обязательного технического отчета.

В работе рассматривается вопрос контроля функционирования готового изделия до его выпуска, возможности оптимизации данной операции на производстве.

Для прохождения функционального тестирования на предприятии предусмотрено рабочее место, оборудованное стендом контроля функционирования изделия. Кроме того, в настоящее время на рынке труда присутствуют проблемы недостаточной квалификации подавляющего большинства рабочей силы и нехватки специалистов в целом.

Стенд для контроля функционирования изделия (СКФ) — специализированное испытательное оборудование, которое помогает анализировать поведение устройства и выявлять возможные дефекты до этапа серийного выпуска. СКФ выполняет следующие задачи: оценка функционала изделия; выявление возможного брака [2].

Цель данной работы — повысить качество и скорость выполнения операции контроля функционирования на производстве за счет исключения человеческого фактора.

В настоящее время контроль большей части функционала тахографа «Спутник» производится человеком вручную на основе субъективной информации, получаемой им через органы чувств. Данный подход является классическим в контроле функционирования устройств, включающих в себя пользовательский интерфейс. Стенд контроля функционирования представляет собой лишь набор интерфейсов для подключения устройства к питанию и ПК для запуска тестового ПО (рис. 1).

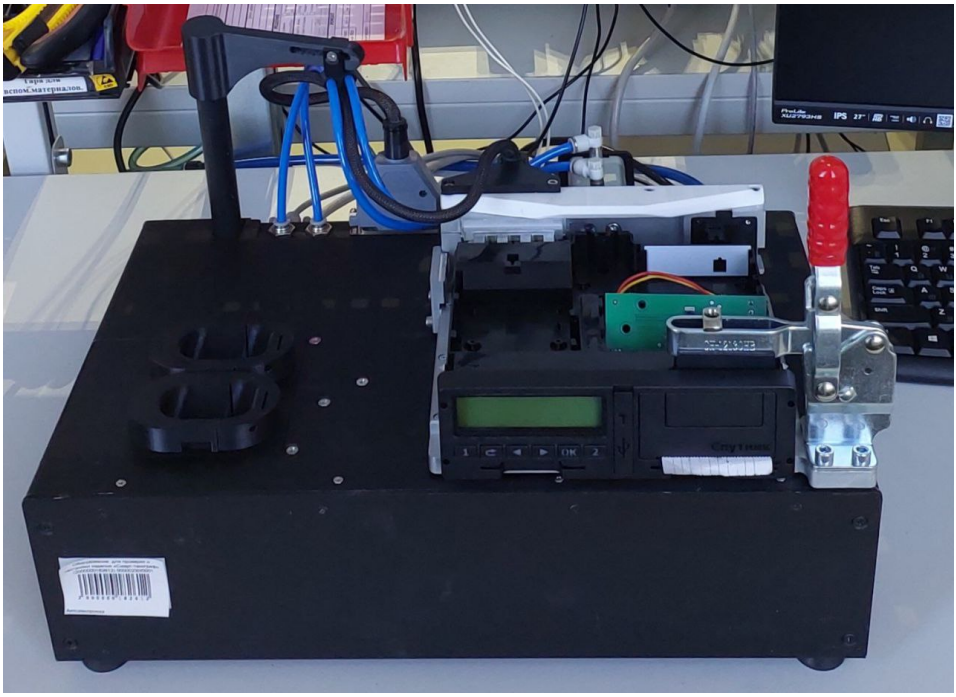


Рис. 1. Исходный СКФ тахографа

Такой подход подвержен влиянию человеческого фактора: работник может не заметить некорректную работу устройства. Усталость, ограниченное время на проверку, монотонность операций — все это увеличивает вероятность ошибок. В результате некорректно функционирующие устройства могут оказаться в эксплуатации.

Для устранения указанных проблем предлагается внедрение автоматизированной системы стенда контроля функционирования, основанной на применении машинного зрения (рис. 2). Система включает в себя стенд для фиксации тахографа, камеру высокого разрешения, интерфейсы для подключения питания и обеспечения связи тахографа с ПК и камеры с ПК, а также программно-аппаратный модуль обработки изображений.

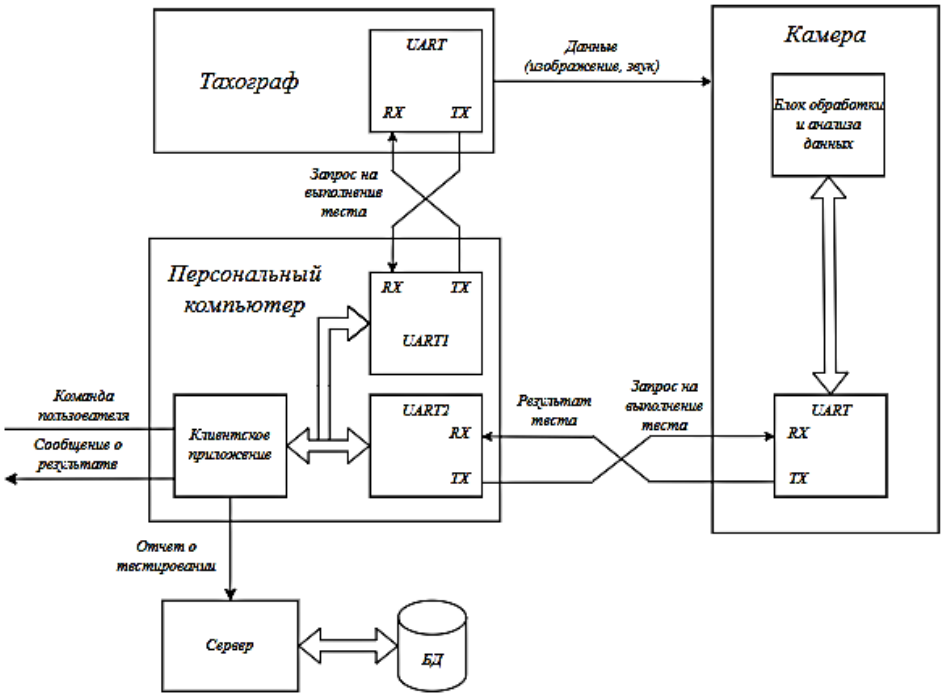


Рис. 2. Структура автоматизированного СКФ

Данная система позволяет автоматически осуществлять контроль функционирования lcd-экрана и его подсветки. Камера фиксирует изображение экрана тахографа, передает его в модуль обработки, где с применением алгоритмов компьютерного зрения и искусственного интеллекта производится анализ цветности подсветки экрана.

Искусственный интеллект — технологии, позволяющие компьютерам выполнять задачи, требующие человеческого мышления [3]. Например, понимать язык, распознавать изображения, находить закономерности в данных.

Компьютерное зрение — область искусственного интеллекта, занимающаяся анализом изображений и видео. Задачи компьютерного зрения: распознавание объектов, классификация изображений, сегментация, слежение за движущимися объектами, реконструкция 3D-сцен из 2D-изображений [4].

Решение проблемы (рис. 3):

– разработано пользовательское приложение на языке C#, включающее в себя протоколы общения ПК с тахографом и камерой (UART), пользовательский интерфейс для проведения тестирования устройства и получения информации о его результате;

– разработана программа функционирования камеры на языке Python, включающая в себя модуль общения с ПК и модуль обработки визуальных данных.

Ниже приведен фрагмент программного кода, реализующий протокол общения ПК с Камерой:

```
public void StartNewThread()
{
 DialogThread = new Thread(new ThreadStart(DialogMethod));
 DialogThread.Start();
}
//Функция работы второго потока
public void DialogMethod()
{
 while (true)
 {
 while (serialPort.IsOpen)
 {
 mutex.WaitOne();
 DateTime now = DateTime.Now;
 TimeSpan differ = now.Subtract(reciv);
 double diffSec = differ.TotalSeconds;
 serialPort.Write(dataToSend, 0, dataToSend.Length);
 displayMessage(string.Join(" ", dataToSend.Select(b =>
    b.ToString("X2"))), textBoxTerminal);
 if (diffSec > 2)
 {
 serialPort.Close();
 displayMessage("Порт закрыт, время ожидания превышено", textBoxCon-
    sole);
 }
 mutex.ReleaseMutex();
 Thread.Sleep(1500);
 }
 Thread.Sleep(1500);
 }
}
//Функция вывода собщения
public void displayMessage(string msg, TextBox textBox)
{
 textBox.Invoke((MethodInvoker)delegate
 {
 textBox.AppendText(Environment.NewLine + msg);
 });
}
```

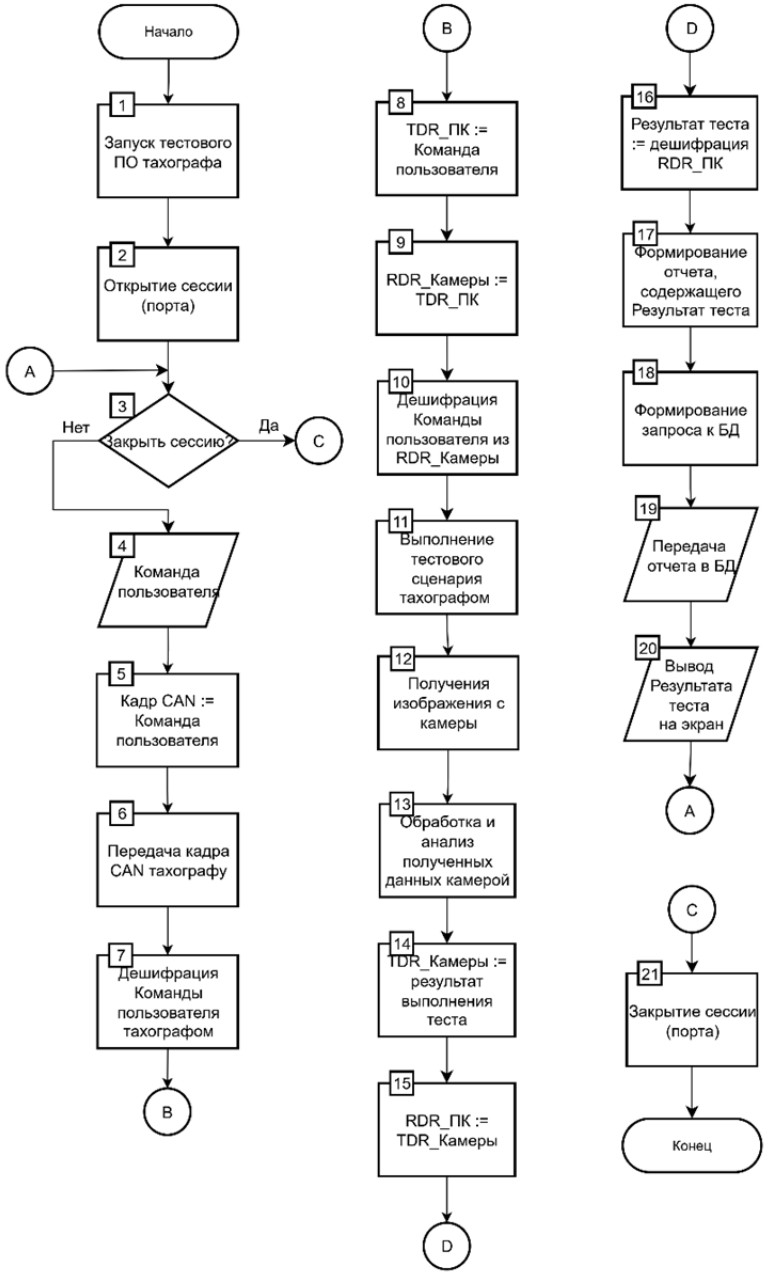


Рис. 3. Общий алгоритм работы СКФ

Функциональные особенности системы:

– обнаружение цвета подсветки экрана (рис. 4) (проверка корректности отображение трех базовых цветов RGB);

– оценка однородности подсветки экрана (рис. 5) (выявление пятен с более низкой яркостью подсветки);

– выявление бракованных светодиодов подсветки экрана (отображается на экране).

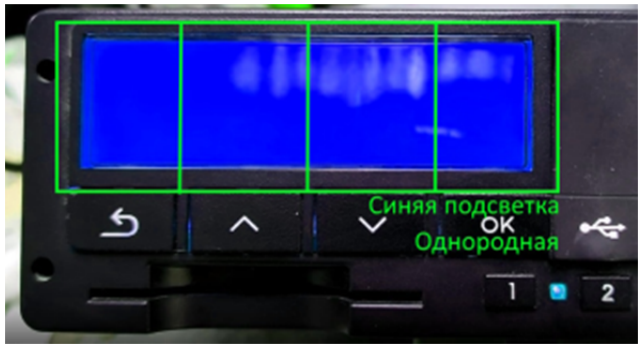


Рис. 4. Обнаружение цвета подсветки



Рис. 5. Проверка однородности подсветки

Программный модуль обработки изображений включает в себя фильтрацию изображений для устранения шумов, появляющихся на камере [5]. Алгоритмы распознавания адаптированы к различным условиям освещения и незначительным допускам в расположении компонентов, что обеспечивает устойчивую и надежную работу системы в производственной среде.

Работа выполнена на предприятии АО «Автоэлектроника», расположенном в г. Калуге.

Разрабатываемая система позволит:

– минимизировать влияние человеческого фактора при тестировании изделия;

– сократить времени проверки устройства;

– стандартизировать и повысить точность контроля функционирования изделия;

– фиксировать результаты тестирования в автоматическом режиме;

– сократить количество брака выпускаемой продукции на производстве.

Применение машинного зрения в задаче контроля функционирования устройства представляет собой технологически обоснованный и практический подход к решению задачи повышения качества выпускаемой продукции. Автоматизация данного этапа позволяет сократить вероятность дефекта выпускаемых устройств и обеспечить стабильность производственного процесса. Учитывая тенденции развития современных производств, предлагаемый подход может быть эффективно масштабирован и адаптирован к аналогичным задачам в смежных отраслях.

Список источников

[1] Волков В.С. *Основы расчета систем автомобилей, обеспечивающих безопасность движения*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, 144 с.

[2] Серенков П.С., Савкова Е.Н., Жагора Н.А. *Методы менеджмента качества. Контроль и испытания продукции*. Минск, Новое знание, 2015, 480 с.

[3] Терк М., Дэвис Р. *Компьютерное зрение. Передовые методы и глубокое обучение*. Москва, ДМК Пресс, 2022, 690 с.

[4] Селянкин В.В. *Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений*. Санкт-Петербург, Лань, 2026, 152 с.

[5] Матвеев А.И. *Цифровая обработка изображений в OpenCv. Практикум*. Санкт-Петербург, Лань, 2023, 104 с.

Automated tachograph control stand system

Onufrieva Tatyana Alexandrovna onufrievata@bmstu.ru
Baranov Vladislav Andreevich baranovva@student.bmstu.ru
Mushkambaryan Davit Taronovich mushkambaryandt@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of monitoring the functioning of tachographs in production is considered, in particular, checking the correct operation of the backlight of the lcd screen. An automated control system based on the application of machine vision methods is presented. It is shown that the developed algorithm, which includes the stages of image preprocessing, color spot search, and comparison with reference samples, makes it possible to identify the state of the screen backlight. It is concluded that the proposed solution allows minimizing the influence of the human factor, standardizing the process and increasing its accuracy. This system is suitable for automating the control of operation on production lines, which ensures a reduction in defective products.

Keywords: *tachograph, machine vision, control of functioning, image processing, reliability, production process, acceptance tests, algorithm, human factor, defect, product quality, screen illumination*

УДК 004.415

Разработка программного модуля для анализа данных тахографов на платформе .NET

Онуфриева Татьяна Александровна onufrievata@bmstu.ru
Скрябин Александр Александрович skryabinaa1@student.bmstu.ru
Баранов Владислав Андреевич baranovva@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема анализа данных цифровых тахографов коммерческого автотранспорта. Представлено разработанное программное решение для расшифровки специализированных DDD-файлов. Показано, что использование собственного ПО позволяет устранить зависимость от коммерческих лицензий, повысить безопасность данных и адаптировать функционал под конкретные бизнес-процессы предприятия. Сделаны выводы, что предложенный модуль можно применять для автоматизированного контроля режимов труда и отдыха водителей, анализа стиля вождения и оптимизации логистических процессов.

Ключевые слова: *тахограф, анализ данных, программный модуль, .NET, безопасность дорожного движения*

Целью работы является разработка программного модуля для расшифровки и анализа DDD-файлов тахографов, формируемых на основе данных, накапливающихся в процессе эксплуатации (номера карточек, ФИО водителей, регион, данные о правах, регистрационные знаки ТС и т. д.), на платформе .NET.

В процессе разработки необходимо исследовать: анализ структуры DDD-файлов, разработку алгоритмов парсинга бинарных данных, создание многомодульной архитектуры приложения, реализацию механизмов обработки ошибок и тестирование работоспособности решения на реальных данных.

Методы исследований. Для обработки бинарной структуры DDD-файлов использован объектно-ориентированный подход на языке C#. Разработаны специализированные парсеры для различных типов данных (ICC, события, неисправности, активность водителя). Применен модульный принцип архитектуры с разделением ответственности между компонентами. Для работы с временными метками реализованы универсальные алгоритмы конвертации различных форматов представления времени.

Разработан программный модуль с графическим интерфейсом, способный: автоматически определять тип загружаемого файла (карта водителя/тахограф), парсить структурированные блоки данных по формату: ТЭГ (2 байта) + File Type (1 байт) + ДЛИНА (2 байта) + Данные [1], извлекать информацию о деятельности водителей за 28–365 дней, анализировать режимы труда и отдыха, выявлять события и нарушения, формировать структурированные отчеты.

В процессе разработки были учтены нормативно-правовые акты, регулирующие работу водителя и транспортного средства, например соблюдение режима труда и отдыха, регламентированного законодательством (Технический регламент Таможенного союза, Приказ Минтранса № 15 в России, правила ЕСТР в Европе) [2]. К нормам относятся: максимальное время управления (9/10 часов), общее рабочее время (не более 12 часов), обязательные перерывы (не менее 45 минут после 4.5 часов управления) и ежедневный (не менее 11 часов) и еженедельный отдых (не менее 45 часов) [3].

Состояние водителя — комплексный показатель, на который влияют десятки факторов, которые можно разделить на две основные группы:

– физиологические (усталость, недосып, болезнь, прием лекарств) и психологические факторы (стресс, эмоциональное состояние);

– техническая исправность, параметры движения.

Для комплексного контроля этих аспектов в процессе эксплуатации необходимо отслеживать ключевые параметры, такие как скорость движения, пробег, режимы деятельности водителя, события и нарушения [4, 5].

Именно эти данные регистрирует тахограф — техническое средство контроля, являющееся «черным ящиком» для коммерческого ТС. Тахограф осуществляет контроль состояния водителя и состояния автомобиля. В данной работе рассматривается вопрос мониторинга и анализа информации, получаемой с тахографов, и обосновывается необходимость разработки собственного программного обеспечения для их расшифровки.

В период эксплуатации данные можно получить с карты водителя и из памяти самого тахографа. Информация распределена между разными типами карт: на карте водителя хранится: данные о владельце (ФИО, номер) и подробная история его деятельности за последние 28 дней (режимы работы, отдыха, события и нарушения). Это главное, что проверяет инспектор. Из памяти тахографа (считывается картой компании или мастерской) можно получить: данные о деятельности всех водителей за последние 365 дней, подробные данные о пробеге и скорости ТС, полный лог всех событий и нарушений, а также данные о калибровке. Все эти показатели хранятся в специализированных файлах с расширением .ddd. Для их чтения и анализа требуется специализированное ПО.

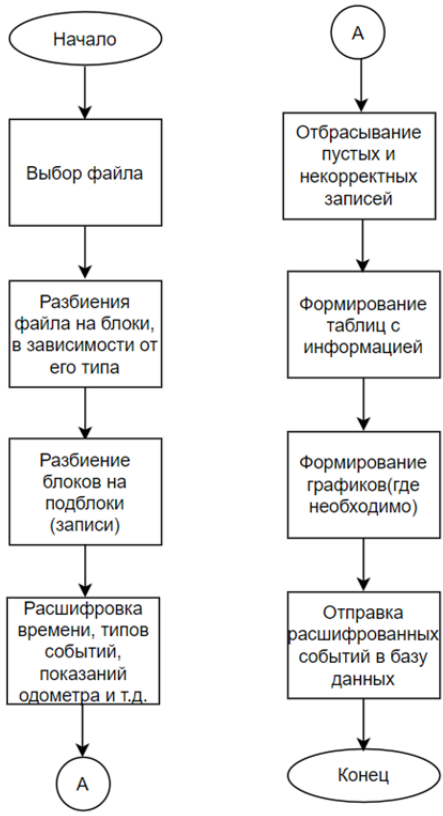
В качестве решения предлагается разработка модуля для расшифровки DDD-файлов, интегрируемого в существующее ПО для выгрузки файлов из тахографа и карточек. Язык разработки: C# (.NET Framework/WinForms) [6]. Архитектура: модульное desktop-приложение с графическим интерфейсом.

Обобщенный алгоритм работы модуля. 1. Загрузка файла: пользователь через интерфейс загружает DDD-файл в систему. 2. Определение типа файла: автоматическое распознавание типа файла (карта водителя/тахограф) по имени файла. 3. Парсинг структурированных блоков [7]: анализ бинарной структуры файла, извлечение блоков данных по формату ТЭГ (2 байта) + File Type (1 байт) + ДЛИНА (2 байта) + Данные. 4. Декодирование блоков данных: последовательный парсинг различных типов блоков (ICC, IC, Application

Identification, Events Data, Faults Data, Driver Activity Data, Vehicles Used, Places и так далее). 5. Структурирование и отображение: преобразование извлеченных данных в читаемый формат с отображением в соответствующих вкладках интерфейса.

Структура DDD-файла. DDD-файлы имеют бинарную структуру, состоящую из последовательности блоков данных. Каждый блок содержит: File ID (2 байта) — идентификатор типа блока. File Type (1 байт) — тип файла. Length (2 байта) — длина данных блока. Data (N байтов) — полезные данные.

Ниже представлен общий алгоритм работы программы (см. рисунок).



Общий алгоритм парсинга DDD-файлов

Пример кода парсинга структуры блока (C#):

```
private void ParseStructuredBlocks()
{
 int position = 0;
 int blockCount = 0;
 while (position < _fileData.Length – 10 && blockCount < 100)
```

```
 {
 try
 {
 // Парсим структуру: ТЭГ (2 байта) + File Type (1 байт) + ДЛИНА (2
    байта) + Данные
 if (position + 5 > _fileData.Length) break;
 // 1. ТЭГ блока (2 байта)
 byte tagByte1 = _fileData[position];
 byte tagByte2 = _fileData[position + 1];
 string tag = $"{tagByte1:X2}{tagByte2:X2}";
 // 2. File Type (1 байт)
 byte fileType = _fileData[position + 2];
 // 3. ДЛИНА (2 байта)
 int length = (_fileData[position + 3] << 8) | _fileData[position +
    4];
 // Проверяем валидность длины
 if (length > 0 && position + 5 + length <= _fileData.Length &&
    length < 100000)
 {
 // 4. Данные блока
 byte[] blockData = new byte[length];
 Array.Copy(_fileData, position + 5, blockData, 0, length);
 var entry = CreateFileEntry(tag, fileType, length, blockData, posi-
    tion);
 _fileEntries.Add(entry);
 position += 5 + length;
 blockCount++;
 }
 else
 {
 position++;
 }
 }
 catch (Exception)
 {
 position++;
 }
 }
}
```

Пример разбиения блока Vehicles Used из DDD-файла на отдельные записи приведен в таблице. В шестнадцатеричном представлении блок имеет следующий вид:: 66 87 C1 8B 66 87 C1 97 2B 05 B0 31 32 33 B0 B0 37 38 20 20 20 20 20 00 01 00 00 00 00 00 00 68 A4 5A A8 68 A5 0F FF 2B 05 42 31 32 33 42 42 34 30 20 20 20 20 20 00 02 00 00 00 00 00 00 68 A5 10 00 68 A6 61 7F 2B 05 42 31 32 33 42 42 34 30 20 20 20 20 20 00 06. Мы можем разбить его на 3 записи.

Таким образом, внедрение собственного программного обеспечения для расшифровки DDD-файлов тахографов, реализованного на платформе .NET (C#), является стратегически важным шагом для современных автотранспортных предприятий. Такой инструмент дает возможность компаниям эффективно контролировать рабочий процесс, повышать дисциплину водителей, оптимизировать логистику и, как следствие, минимизировать риски,

связанные с безопасностью дорожного движения. Работы по разработке программного модуля выполнялись на АО «Автоэлектроника».

Результаты декодирования записей блока Vehicles Used DDD-файла

Начальные показания одометра	Конечные показания одометра	Начало использования ТС	Конец использования ТС	Страна регистрации	Регистрационный номер ТС	Номер блока
0 Hex:000000	0 Hex:000000	05.07.2024 9:48:59 Hex:66 87 C1 8B	05.07.2024 9:49:11 Hex: 66 87 C1 97	Russian Federation Hex:2B	A123AA78 Hex: 05 B0 31 32 33 B0 B0 37 38 20 20 20 20 20	0001 Hex: 01
0 Hex:000000	0 Hex:000000	19.08.2025 11:06:16 Hex:68 A4 5A A8	19.08.2025 23:59:59 Hex: 68 A5 0F FF	Russian Federation Hex:2B	B123BB40 Hex: 05 42 31 32 33 42 42 34 30 20 20 20 20 20	0002 Hex: 02
0 Hex:000000	0 Hex:000000	20.08.2025 0:00:00 Hex:68 A5 10 00	20.08.2025 23:59:59 Hex: 68 A6 61 7F	Russian Federation Hex:2B	B123BB40 Hex: 05 42 31 32 33 42 42 34 30 20 20 20 20 20	0006 Hex: 06

Список источников

[1] ГОСТ Р 53876–2010. *Устройства бортовые регистрации параметров работы транспортных средств. Технические требования*. Москва, Стандартинформ, 2010, 24 с.

[2] *О безопасности колесных транспортных средств (ТР ТС 018/2011).* Технический регламент Таможенного союза. Москва, 2011, 156 с.

[3] *Об утверждении Положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха водителей автомобилей*. Приказ Минтранса России от 20 августа 2004 г. № 15. Москва, 2004, 28 с.

[4] Трофимов А.А. *Цифровые тахографы: эксплуатация и техническое обслуживание*. Москва, Транспорт, 2018, 216 с.

[5] Козлов Д.В., Петров С.И. Методы обработки бинарных данных в системах мониторинга транспорта. *Транспортные системы*, 2021, № 4, с. 45–52.

[6] Орлов Д.Н. *Программирование на C# для начинающих*. Москва, Бином, 2019, 384 с.

[7] Родионов А.В. Архитектура программных систем обработки транспортных данных. *Программная инженерия*, 2020, № 5, с. 12–19.

Development of a software module for tachograph data analysis on the .NET platform

Onufrieva Tatyana Alexandrovna onufrievata@bmstu.ru
Skryabin Alexandr Alexandrovich skryabinaa1@student.bmstu.ru
Baranov Vladislav Andreevich baranovva@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of analyzing digital tachograph data of commercial vehicles is considered. A developed software solution for decoding specialized DDD files is presented. It is shown that using proprietary software eliminates dependence on commercial licenses, improves data security and adapts functionality to specific business processes of the enterprise. Conclusions are made that the proposed module can be used for automated monitoring of drivers' working and rest hours, analysis of driving style and optimization of logistics processes.

Keywords: *tachograph, data analysis, software module, .NET, road safety*

УДК 004.91

Автоматизированная система контроля качества сборки тахографа

Онуфриева Татьяна Александровна onufrievata@bmstu.ru
Мушкамбарян Давит Таронович mushkambaryandt@student.bmstu.ru
Скрябин Александр Александрович skryabinaa1@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема контроля качества сборки тахографов, в частности операция проверки наличия и затяжки крепежных болтов печатной платы. Представлена автоматизированная система контроля, основанная на применении методов машинного зрения. Показано, что разработанный алгоритм шаблонного сопоставления, включающий этапы предобработки изображения, выравнивания платы и сравнения с эталонными образцами, позволяет идентифицировать состояние болтов. Сделаны выводы, что предложенное решение позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, стандартизировать процесс и повысить его точность. Данную систему можно применять для автоматизации контроля качества на сборочных линиях, что обеспечивает снижение брака и повышение надежности конечной продукции.

Ключевые слова: *тахограф, машинное зрение, контроль качества, автоматизация, печатная плата, болты крепления, шаблоны, обработка изображений, сборка устройства, надежность, производственный процесс, алгоритм, эталонный образец, человеческий фактор, дефекты сборки, качество продукции*

Современная автомобильная промышленность характеризуется возрастающими требованиями к безопасности, надежности и долговечности транспортных средств. Особую роль играет исправность бортового оборудования, к которому предъявляются строгие стандарты качества на этапе производства и в течение всего жизненного цикла изделия. Один из критически важных устройств в коммерческом и пассажирском транспорте — тахограф. Это прибор, регистрирующий параметры движения транспортного средства (скорость, пройденный путь, время работы водителя и периоды отдыха). Достоверность и бесперебойность функционирования тахографа влияют на безопасность движения и соответствие законодательным нормам [1].

В процессе сборки тахографов важным элементом обеспечения надежности устройства является правильная установка и фиксация печатной платы внутри корпуса устройства (рис. 1). Плата крепится шестью болтами, каждый из которых играет критическую роль в обеспечении механической устойчивости и корректной работы прибора в условиях транспортных нагрузок.

На практике контроль качества сборки, включая проверку наличия и затяжки крепежных элементов, часто осуществляется вручную. Такой подход подвержен влиянию человеческого фактора: оператор может не заметить отсутствующий или незакрученный болт. Усталость, ограниченное время

на проверку, монотонность операций — все увеличивает вероятность ошибок. В результате возможно возникновение скрытых дефектов, которые проявятся уже в процессе эксплуатации устройства, ведя к увеличению вероятности отказов и росту затрат на сервисное обслуживание.

Цель — повысить надежность и эффективность контроля качества сборки устройства «Тахограф».

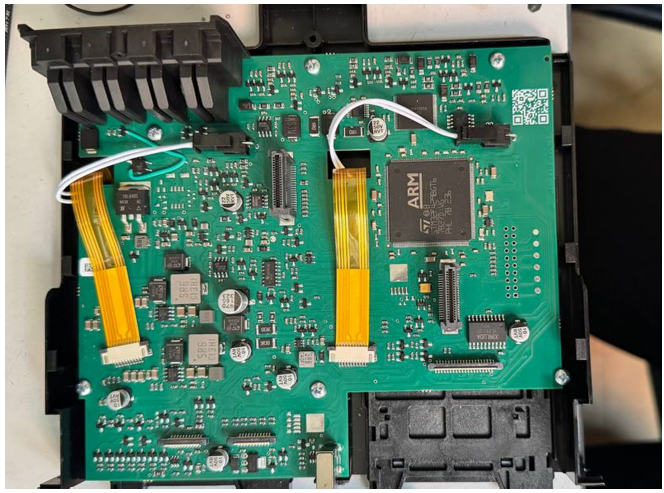


Рис. 1. Печатная плата тахографа

Для устранения указанных недостатков предлагается внедрение автоматизированной системы, основанной на применении методов машинного зрения, которая обеспечивает контроль наличия всех шести болтов на печатной плате тахографа [2].

В состав системы входит стенд для фиксации тахографа, камера высокого разрешения, установленная над областью интереса, а также программно-аппаратный модуль обработки изображений (рис. 2).

Контроль выполняется в автоматическом режиме: камера делает снимок зоны установки печатной платы, после чего изображение поступает в модуль обработки. Для определения состояния болта был разработан алгоритм шаблонного сопоставления.

Алгоритм функционирует следующим образом.

1. На снимке выделяется участок, где находится сама плата, с помощью фильтра по зеленому цвету. Так как на изображении могут быть лишние блики, тени и шумы, применяется специальная обработка — морфологические операции, которые «очищают» картинку: убирают мелкие пятна, замыкают разрывы по контуру и позволяют получить четкую форму платы.

2. Если плата на снимке установлена под углом, программа вычисляет ее наклон и поворачивает изображение, чтобы плата занимала строго горизон-

тальное положение. Так каждая проверяемая область находится в одинаковом месте независимо от положения устройства.

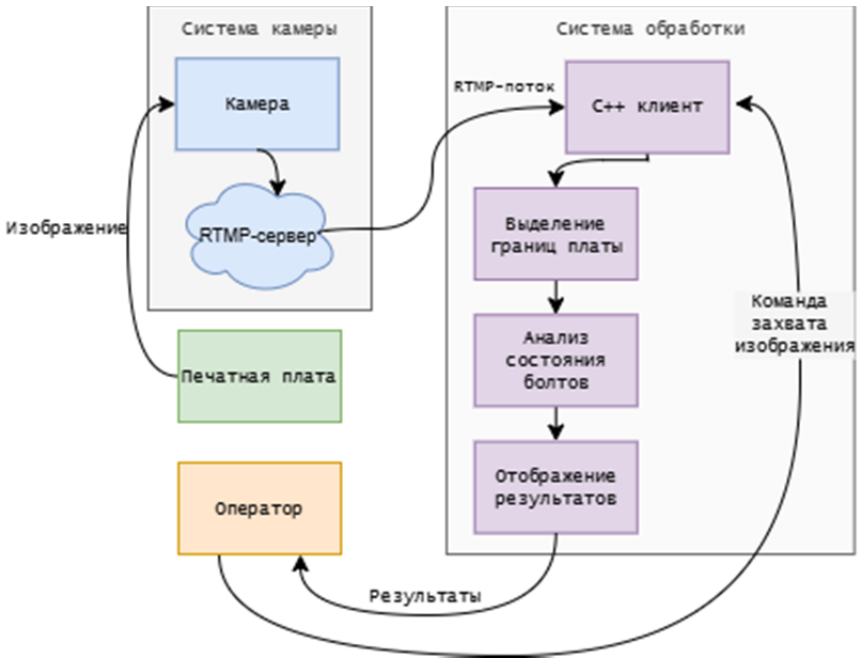


Рис. 2. Структурная схема системы

3. После выравнивания изображения платы программным способом задаются фиксированные прямоугольные области, соответствующие проектному расположению крепежных элементов. Координаты этих областей определяются на основе эталонной геометрии платы и остаются неизменными для всех проверяемых устройств. Таким выделяются шесть стабильных областей интереса (ROI), обеспечивая повторяемость и точность позиционирования при последующем анализе [3].

4. Для каждой зоны система берет фрагмент изображения и сравнивает его с заранее подготовленными образцами — шаблонами «болта» и «отверстия». Сравнение выполняется математически: программа вычисляет, насколько текущий участок похож на шаблон [4].

5. Если участок изображения больше похож на шаблон болта и показатель совпадения превышает заданный порог, система считает — болт установлен. Если же совпадение ближе к шаблону отверстия — фиксируется отсутствие болта.

6. После анализа всех зон система визуализирует результат: вокруг каждого места крепления появляется рамка — зеленая при наличии болта и красная при его отсутствии.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет автоматически и надежно определять наличие болтов, обеспечивая точный и повторяемый контроль без участия оператора (рис. 3).

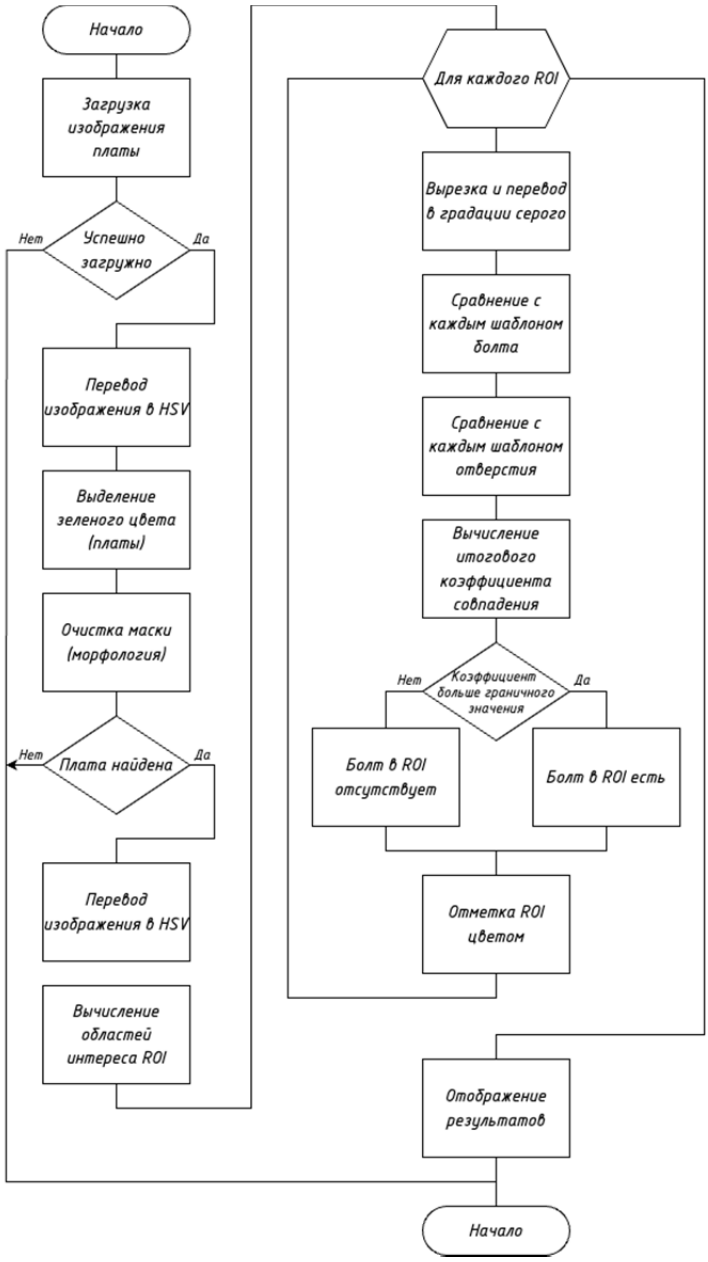


Рис. 3. Алгоритм функционирования

Часть программного кода, отвечающая за принятие решения о наличии либо отсутствии *i*-го болта на месте, представлена на рис. 4.

```
Mat res1;
matchTemplate(grayROI, templ_bolt, res1, TM_CCOEFF_NORMED);
imshow("res1", res1);
double maxVal1TMP;
minMaxLoc(res1, nullptr, &maxVal1TMP);
maxVal1 += maxVal1TMP;

Mat res2;
matchTemplate(grayROI, templ_hole, res2, TM_CCOEFF_NORMED);
imshow("res2", res2);
double maxVal2TMP;
minMaxLoc(res2, nullptr, &maxVal2TMP);
maxVal2 += maxVal2TMP;

cout << "(совпадение болта=" << maxVal1TMP << ", дырки=" << maxVal2TMP << ")\n";
```

Рис. 4. Определение наличия болта

Алгоритмы распознавания адаптированы к различным условиям освещения и незначительным допускам в расположении компонентов, обеспечивая устойчивую и надежную работу системы в производственной среде [5].

Внедрение предложенного решения позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, стандартизировать и повысить точности контроля, сократить время проверки, повысить общую надежность тахографа за счет гарантированного качества сборки.

Таким образом, применение машинного зрения в задаче контроля крепления печатной платы представляет собой технологически обоснованный и практический подход к решению задачи повышения качества сборки. Автоматизация данного этапа позволяет сократить вероятность возникновения дефектов и обеспечить стабильность производственного процесса. Учитывая тенденции развития современных производств и возрастающие требования к надежности электронных компонентов, предлагаемый подход может быть эффективно масштабирован и адаптирован к аналогичным задачам в смежных отраслях.

Список источников

[1] Челяковский М. *Машинное зрение в автоматизации производства: теория и практика*. Москва, Техносфера, 2019, 280 с.

[2] Форсайт Дж. *Компьютерное зрение: современный подход*. Москва, Вильямс, 2023, 928 с.

[3] Иванов В.П., Петров С.К. *Автоматизация производственных процессов с использованием машинного зрения*. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 256 с.

[4] Авсиевич А.В. и др. Организация производственного контроля на линии сборки полуприцепов с использованием машинного зрения. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2024, т. 26, № 6, с. 142–146.

[5] Корнейчук В.С. и др. Применение машинного зрения для вычисления размеров дефектов при люминесцентном проникающем контроле лопаток ГТД. *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2022, № 1(106), с. 31–41.

Automated quality control system for tachograph assembly

Onufrieva Tatyana Alexandrovna onufrievata@bmstu.ru
Mushkambaryan Davit Taronovich mushkambaryandt@student.bmstu.ru
Skrybin Alexandr Alexandrovich skryabinaa1@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The problem of quality control in tachograph assembly is considered, specifically the operation of checking the presence and tightness of printed circuit board fastening bolts. An automated control system based on machine vision methods is presented. It is shown that the developed template matching algorithm, which includes stages of image preprocessing, board alignment, and comparison with reference templates, allows for identification of the bolt condition. Conclusions are made that the proposed solution minimizes the influence of the human factor, standardizes the process, and increases its accuracy. This system can be applied to automate quality control on assembly lines, ensuring a reduction in defects and an increase in the reliability of the final product.

Keywords: *tachograph, machine vision, quality control, automation, printed circuit board, fastening bolts, templates, image processing, device assembly, reliability, production process, algorithm, reference template, human factor, assembly defects, product quality*

УДК 004.9:616-056.3:614.2

AlertaCold: система мониторинга рисков при холодовой аллергии

Давидович Анна Александровна davidovicanna39@gmail.com

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена разработка прототипа мобильного приложения «AlertaCold», предназначенного для персонализированного мониторинга рисков возникновения аллергических реакций на холод. Это междисциплинарная работа, сочетающая методы проектирования программных систем, анализ медицинских данных и элементы машинного обучения. Цель работы — создание прототипа приложения для решения узкой, но социально значимой медицинской проблемы. Доклад приурочен к актуализации вопросов цифровизации здравоохранения и развития персонализированных медицинских технологий.

Ключевые слова: *программно-информационная система, холодовая крапивница, персонализированная медицина, мобильное приложение, алгоритм оценки риска, цифровое здравоохранение*

В начале XXI в. с развитием цифровых технологий и широким распространением носимых устройств появилась возможность создания специализированных программных решений для мониторинга здоровья [1]. Однако многие узкие медицинские проблемы, такие как холодовая крапивница, остаются без внимания разработчиков массовых приложений [2], что существенно ограничивает качество жизни пациентов, стремящихся поддерживать физическую активность.

Разработан прототип мобильной системы AlertaCold, предназначенной для персонализированной оценки рисков возникновения аллергических реакций на холод. Основная цель проекта — создание доступного цифрового инструмента, позволяющего пользователям безопасно поддерживать физическую активность в условиях холодного климата.

Для достижения этой цели решаются следующие задачи.

1. Проведен комплексный анализ патогенеза холодовой крапивницы и выявить ключевые триггеры, влияющие на развитие аллергических реакций. Особое внимание уделено изучению взаимодействию различных факторов — температуры, влажности, скорости ветра, типа и интенсивности физической нагрузки.

2. Разработана архитектура программно-информационной системы, обеспечивающая сбор, обработку и анализ данных из разнородных источников, включая носимые устройства, внешние метеорологические сервисы и пользовательский ввод.

3. Создана математическая модель оценки индивидуального риска, основанная на анализе множества параметров и способную адаптироваться к особенностям конкретного пользователя.

4. Спроектированы интуитивные пользовательские сценарии взаимодействия, обеспечивающие простоту и эффективность использования системы для людей с различным уровнем технической подготовки.

5. Разработана методика калибровки системы, позволяющая определить индивидуальные параметры чувствительности пользователя и повысить точность прогнозов.

Разработанная система AlertaCold построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость, масштабируемость и надежность работы. Архитектура системы включает следующие ключевые компоненты:

Модуль сбора данных отвечает за получение информации из трех основных источников. Первый источник — носимые устройства (умные часы, фитнес-трекеры), которые предоставляют данные о пульсе, вариабельности сердечного ритма, уровне физической активности. Второй источник — внешние метеорологические сервисы, поставляющие актуальную информацию о температуре, влажности, скорости ветра, атмосферном давлении. Третий источник — пользовательский ввод, включающий данные анкетирования, результаты самонаблюдения, информацию о приеме противоаллергических препаратов.

Аналитический модуль представляет собой ядро системы, в котором реализована математическая модель оценки риска. Этот модуль обрабатывает поступающие данные, вычисляет уровень текущего риска, формирует прогнозы и генерирует персонализированные рекомендации. Модуль использует методы машинного обучения для постоянного улучшения точности прогнозов на основе накапливаемых данных.

Модуль визуализации обеспечивает представление результатов анализа в удобной для пользователя форме. Он включает несколько компонентов: главный дашборд с индикатором текущего уровня риска, интерактивную карту с зонами риска, графики динамики показателей, дневник самонаблюдения.

Модуль калибровки позволяет настроить систему под индивидуальные особенности пользователя. Он проводит пользователя через серию безопасных тестов, определяет персональные параметры чувствительности и устанавливает коэффициенты для математической модели.

Основой системы является разработанная математическая модель, которая вычисляет интегральный показатель риска возникновения аллергической реакции. Модель основана на формуле

$$\text{РИСК} = (\text{Холод} \times A) + (\text{Нагрузка} \times B),$$

где Холод — комплексный показатель, учитывающий влияние факторов внешней среды. Он рассчитывается по шкале от 1 до 10 баллов на основе температуры воздуха и скорости ветра; Нагрузка — показатель, характеризующий интенсивность физической активности, также оценивается по шкале от 1 до 10 баллов; A и B — персональные коэффициенты, определяемые в процессе калибровки системы. Эти коэффициенты отражают индивидуальную чувствительность пользователя к факторам холода и физической нагруз-

ки соответственно. Сумма коэффициентов всегда равна 1, что обеспечивает нормировку показателя риска.

Для примера рассмотрим двух пользователей с разными профилями чувствительности. Первый пользователь имеет коэффициенты A = 0,7 и B = 0,3, что указывает на высокую чувствительность к холоду. При условиях: температура –2°C, ветер 7 м/с (холод = 8 баллов) и бег (нагрузка = 8 баллов) расчет риска дает: (8 × 0,7) + (8 × 0,3) = 8,0 — высокий риск. Второй пользователь с коэффициентами A = 0,5 и B = 0,5 при тех же условиях получит риск 6,4 — умеренный риск.

Разработаны интуитивные пользовательские сценарии, охватывающие все основные аспекты взаимодействия с системой:

Сценарий первичной настройки включает знакомство с приложением, получение информированного согласия о немедицинском характере системы, заполнение детальной анкеты, собирающей информацию об образе жизни, привычной физической активности, известных триггерах и тяжести симптомов.

Сценарий ежедневного мониторинга предусматривает просмотр главного экрана с индикатором текущего уровня риска, получение персонализированных рекомендаций, изучение карты с зонами риска в районе проживания пользователя. Система предоставляет конкретные советы: «сегодня с 14:00 до 16:00 — оптимальное время для пробежки», «избегайте прогулок в парке у реки — там высокая влажность усиливает охлаждающий эффект».

Сценарий самонаблюдения позволяет пользователю вести дневник симптомов, отмечать уровень стресса, фиксировать прием противоаллергических препаратов. Раз в неделю система предлагает провести краткий опрос для уточнения текущего состояния и при необходимости — повторную калибровку.

Сценарий анализа статистики дает возможность просматривать динамику показателей за различные периоды, анализировать взаимосвязи между факторами среды, физиологическими параметрами и проявлением симптомов.

В результате создан прототип, демонстрирующий возможность прогнозирования рисков с учетом индивидуальных особенностей пользователя [3, 4]. Практическая значимость работы заключается в создании доступного инструмента для улучшения качества жизни пациентов с холодовой крапивницей [2], а также в разработке методологического подхода, применимого для других редких заболеваний [1]. Разработанный подход демонстрирует новые возможности в области цифрового здравоохранения для редких заболеваний. Кроме того, накопленные анонимизированные данные могут представлять ценность для дальнейших медицинских исследований в области аллергологии и создания более совершенных диагностических инструментов.

Таким образом, в работе не только решается конкретная прикладная задача, но и предлагается универсальный подход к созданию специализированных медицинских информационных систем, сочетающий современные технологии с глубоким пониманием специфики медицинской проблемы [1, 3, 5].

Список источников

[1] Debon R. et al. Mobile health applications for chronic diseases: A systematic review of features for lifestyle improvement. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 2019, vol. 13, iss. 4, pp. 2507–2512.

[2] Cheah K.J., Manaf Z.A., Ludin A.F.M., Razalli N.H., Mokhtar N.M., Shm A. Mobile Apps for Common Noncommunicable Disease Management: Systematic Search and Evaluation on App Stores. *JMIR mHealth and uHealth*, 2024, vol. 12, art. no. e49055. https://doi.org/10.2196/49055

[3] Михеев А.Е. Перспективы создания цифровых медицинских экосистем в России: цифровые двойники и другие технологии, проблемы и подходы. *Менеджер здравоохранения*, 2024, № S, с. 4–32. https://doi.org/10.21045/1811-0185-2024-S-4-32

[4] Малых В.Л., Калинин А.Н., Рудецкий С.В. Архитектура взаимодействия в медицинской экосистеме. *Программные системы: теория и приложения*, 2024, т. 15, № 2, с. 475–492. https://doi.org/10.25209/2079-3316-2024-15-2-475-492

[5] Петров В.Ю., Шишиморов И.Н., Магницкая О.В. Персонализированная медицина: эволюция методологии и проблемы практического внедрения. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*, 2016, № 1(57), с. 3–11.

AlertaCold: risk monitoring system for cold allergy

Davidovich Anna Aleksandrovna davidovicanna39@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The development of a prototype mobile application "AlertaCold", designed for personalized monitoring of cold-induced allergy risks, is considered. This is an interdisciplinary work combining software system design methods, medical data analysis, and elements of machine learning. The objective of this work is to develop a prototype application that tackles a specific, yet socially relevant medical problem. The report is timed to the relevance of healthcare digitalization issues and the development of personalized medical technologies.

Keywords: *software-information system, cold urticaria, personalized medicine, mobile application, risk assessment algorithm, digital healthcare*

УДК 004.93

Разработка программного модуля анализа акустических данных для определения направления движения летательных аппаратов

Кулаков Максим Алексеевич kma22ki166@student.bmstu.ru
Крысин Иван Александрович ivan@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена задача повышения безопасности городской среды за счет акустического мониторинга воздушного пространства. Представлено программное решение на языке Python, реализующее захват многоканальных аудиоданных, извлечение признаков, классификацию типа летательного аппарата и определение направления движения на основе метода TDOA и алгоритма GCC-PHAT. Описаны архитектура системы, модули цифровой обработки сигналов и машинного обучения, а также графический интерфейс пользователя. Показано, что разработанный модуль обеспечивает точность определения направления в пределах 8–12° при SNR ≥ 0 дБ. Сделаны выводы о возможности применения системы в комплексах наблюдения за воздушным пространством городов и в научно-исследовательских целях для анализа акустических характеристик летательных аппаратов.

Ключевые слова: *акустический мониторинг, цифровая обработка сигналов, TDOA, GCC-PHAT, машинное обучение, летательные аппараты, безопасность, локализация*

Рассматривается актуальная проблема контроля низковысотного воздушного пространства в городской среде, связанная с ростом числа беспилотных летательных аппаратов [1]. Традиционные радиолокационные системы имеют высокую стоимость, энергопотребление и ограниченную скрытность. Акустические методы позволяют реализовать пассивную локализацию с использованием недорогих микрофонных решеток. В работе представлен программный модуль для анализа многоканальных акустических данных с целью классификации типа летательного аппарата и определения направления его движения в реальном времени. Научная новизна заключается в интеграции алгоритмов TDOA, GCC-PHAT и фильтра Калмана в единую систему с графическим интерфейсом, адаптированную для встраиваемых платформ. Практическая значимость состоит в возможности применения модуля в системах безопасности городской инфраструктуры и научных исследованиях.

Цель работы — разработка программного модуля, обеспечивающего автоматическое обнаружение, классификацию и определение направления движения летательных аппаратов по акустическим сигналам. Для достижения цели решаются задачи: реализация захвата и предобработки многоканального аудиопотока; извлечение временных и спектральных признаков; классификация типа объекта с использованием методов машинного обучения; оценка угла прихода сигнала по методу TDOA; сглаживание траектории фильтром

Калмана; визуализация результатов в графическом интерфейсе; тестирование точности и производительности.

Архитектура и используемые технологии. Система реализована как модульное приложение на языке Python, включающее подсистемы захвата звука, цифровой обработки сигналов, машинного обучения и визуализации [2]. Такой подход обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность интеграции с встраиваемыми устройствами. Захват данных осуществляется с использованием библиотеки sounddevice с синхронной записью с четырех микрофонов, разнесенных на расстоянии 30 см. Предобработка включает полосовую фильтрацию в диапазоне 100–8000 Гц, нормализацию и удаление шума методом спектрального вычитания [3]. Обнаружение события реализовано на основе детектора активности по энергии сигнала с адаптивным порогом. Алгоритм анализа акустических данных представлен на рисунке.

Для классификации типа летательного аппарата используются MFCC, спектральные центроиды и лог-энергия, формирующие вектор из 39 признаков. Классификация выполнена на основе ансамбля Random Forest, обученного на датасете, включающем записи дронов, вертолетов, самолетов и фоновых шумов [4]. Точность классификации на тестовом наборе составила 92 %.

Определение направления движения основано на оценке временной задержки прихода сигнала (TDOA) между микрофонами. Применяется метод обобщенной взаимной корреляции с фазовым преобразованием (GCC-PHAT), обеспечивающий устойчивость к реверберации и шуму [5]. Угол азимута вычисляется на основе временной задержки, скорости звука и расстояния между микрофонами. Для повышения точности используется фильтр Калмана, сглаживающий последовательность оценок угла. Средняя ошибка определения направления составила 8,4° при SNR = 5 дБ и 11,7° при SNR = 0 дБ.

Графический интерфейс разработан с использованием библиотеки PyQt5 и включает отображение волновой формы, спектрограммы, компаса с текущим направлением и таблицы результатов [6]. Поддерживается загрузка файлов формата .wav, экспорт отчетов в CSV и JSON, а также режим реального времени. Производительность системы на платформе Raspberry Pi 4 позволяет обрабатывать 5-секундный фрагмент за 0,42 с, что удовлетворяет требованиям к работе в реальном времени.

Основной функционал системы. Ключевой функционал включает: захват многоканального аудиопотока с микрофонной решетки; автоматическое обнаружение акустических событий; извлечение признаков и классификацию типа летательного аппарата (дрон, вертолет, самолет); определение направления движения в реальном времени; визуализацию входных и обработанных данных; хранение и экспорт результатов анализа.

Дополнительно реализованы: загрузка файлов аудиозаписей с внешних носителей; фильтрация шума и адаптивная настройка порогов обнаружения; отображение траектории движения на компасе; экспорт отчетов в табличном и графическом виде. Система не требует постоянного подключения к сети и может работать автономно на встраиваемых устройствах.



Алгоритм анализа акустических данных для определения направления движения летательных аппаратов

Преимущества и результаты внедрения. Ожидаемые результаты внедрения включают повышение скорости реагирования на несанкционированное проникновение в воздушное пространство, снижение стоимости систем мониторинга и возможность пассивного обнаружения в условиях радиопомех. Тестирование показало устойчивость работы при уровне шума до SNR = –5 дБ.

Разработанный модуль может быть интегрирован в системы гражданской безопасности, комплексы наблюдения за воздушным пространством городов и использован в научно-исследовательских целях. Ограничения связаны

с зависимостью точности от конфигурации микрофонной решетки и уровня фонового шума.

Заключение. Разработан программный модуль анализа акустических данных, обеспечивающий классификацию летательных аппаратов и определение направления их движения с высокой точностью. Система может применяться в комплексах наблюдения за воздушным пространством, системах безопасности и научных исследованиях. Полученные результаты подтверждают эффективность выбранных методов цифровой обработки сигналов и машинного обучения в условиях реальной эксплуатации.

Дальнейшее развитие проекта предполагает расширение функционала за счет интеграции с видеокамерами, реализации 3D-локализации, адаптации под мобильные устройства и создания распределенной сети акустических датчиков. Все новые функции будут реализовываться с сохранением приоритета точности, производительности и энергоэффективности.

Список источников

[1] Кноблих К. *Акустическая локализация источников звука.* Москва, Наука, 2020, 312 с.

[2] Brandstein M., Ward D. *Microphone arrays: signal processing techniques and applications.* Springer, 2013, 398 p.

[3] Vaseghi S.V. *Advanced digital signal processing and noise reduction.* Wiley, 2008, 544 p.

[4] Benesty J., Chen J., Huang Y. *Microphone array signal processing.* Springer, 2008, 224 p.

[5] Knapp C., Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1976, vol. 24, no. 4, pp. 320–327.

[6] McFee B. et al. Librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python. *Proceedings of the 14th Python in Science Conference*, 2015, pp. 18–24. https://doi.org/10.25080/Majora-7b98e3ed-003

Development of a software module for acoustic data analysis to determine the direction of aircraft movement

Kulakov Maksim Alekseevich kma22ki166@student.bmstu.ru

Krysin Ivan Aleksandrovich ivan@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The task of enhancing urban environment safety through acoustic monitoring of airspace is considered. A software solution in Python is presented, implementing multi-channel audio data capture, feature extraction, aircraft type classification, and direction of movement determination based on the TDOA method and GCC-PHAT algorithm. The system architecture, digital signal processing and machine learning modules, as well as the user graphical interface are described. It is shown that the developed module provides direction determination accuracy within 8–12° at SNR ≥ 0 dB. Conclusions are drawn about the possibility of using the system in urban airspace observation complexes and for scientific research purposes to analyze acoustic characteristics of aircraft.

Keywords: *acoustic monitorin, digital signal processing, TDOA, GCC-PHAT, machine learning, aircraft, safety, localization*

УДК 621.316

Разработка системы телемеханики на основе протокола IEC 60870-5-104

Крысин Иван Александрович ivan@bmstu.ru
Гришко Константин Александрович grishkoka@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена модель клиент-серверной системы телемеханики, обеспечивающей обмен технологическими данными по стандарту IEC 60870-5-104. Представлено программное решение, включающее серверный модуль на Node.js, базу данных PostgreSQL и веб-интерфейс визуализации на React. Показано, что использование протокола IEC 104 позволяет реализовать надежный обмен между терминалами подстанций и системами верхнего уровня с возможностью визуализации и управления в реальном времени. Сделаны выводы, что разработанная архитектура может применяться для построения распределенных SCADA-систем и учебных стендов по телемеханике.

Ключевые слова: *телемеханика, протокол IEC 104, сервер, визуализация, SCADA, база данных, подстанция*

Современные процессы цифровизации энергетики сопровождаются активным внедрением интеллектуальных технологий мониторинга и управления технологическими процессами. Переход к концепции «умных сетей» (Smart Grid) предполагает создание единого информационного пространства, где устройства подстанций, контроллеры, датчики и системы диспетчерского управления обмениваются данными в режиме реального времени. Для реализации такой интеграции требуется использование открытых протоколов телемеханики, обеспечивающих совместимость оборудования различных производителей и надежность передачи данных при больших объемах трафика.

Протокол IEC 60870-5-104 (IEC 104) является международным стандартом телемеханики, регламентирующим передачу управляющих и измерительных сообщений по сетям TCP/IP [1]. Его архитектура наследует структуру протокола IEC 101, но расширяет возможности за счет применения стандартных транспортных профилей и гибкости адресации. Использование стека TCP/IP обеспечивает поддержку широкополосных каналов, маршрутизацию трафика и возможность применения существующих механизмов кибербезопасности.

Поставленная задача возникла из-за невозможности эффективного взаимодействия между терминалами подстанций и системами верхнего уровня при использовании устаревших или проприетарных протоколов, не обеспечивающих совместимость с IP-сетями и ограничивающих функциональность SCADA-комплексов [2]. Эти ограничения препятствуют внедрению концепции «цифровой подстанции», где управление и контроль выполняются на основе унифицированных цифровых потоков данных.

В рамках данной работы разработана модель клиент-серверной системы телемеханики, реализующая принципы IEC 104 и демонстрирующая возможность интеграции промышленных протоколов обмена с современными веб-технологиями. Модель предназначена для сбора, хранения, обработки и отображения телеметрической информации с удаленных объектов энергетической инфраструктуры.

Целью исследования является создание программной модели, обеспечивающей двунаправленный обмен данными между терминалами подстанций и сервером диспетчерского уровня, а также визуализацию этих данных в веб-интерфейсе оператора. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Анализ структуры и формата служебных блоков данных ASDU протокола IEC 104.

2. Построение серверного приложения для приема и передачи сообщений в реальном времени.

3. Разработка системы хранения телеметрических данных и событий в СУБД PostgreSQL.

4. Реализация веб-интерфейса для визуализации параметров подстанций с использованием библиотеки React.

5. Экспериментальная проверка стабильности обмена и скорости отклика системы.

Разрабатываемая модель включает три взаимосвязанных компонента: сервер IEC 104 на Node.js, базу данных PostgreSQL и веб-клиент React [3]. Серверная часть обеспечивает прием телемеханических кадров, их синтаксический разбор и преобразование в объектную структуру данных. Для каждого терминала RTU/IED создается отдельное TCP-соединение с обработкой событий «прием» и «передача». Хранилище PostgreSQL используется для долговременного хранения измерений, аварийных сигналов и журналов обмена. Клиентское приложение на React осуществляет запросы к серверу через REST и WebSocket-API, отображая текущие значения параметров на интерактивной карте подстанций и панели состояния оборудования.

Передача информации реализуется в формате ASDU (Application Service Data Unit), который состоит из идентификатора типа, классификатора структуры, причины передачи, общего адреса и набора объектов информации [4]. В предложенной реализации каждый ASDU сопоставляется таблице измерений в базе данных, где фиксируются параметры времени, источник и значение сигнала. Такой подход обеспечивает трассируемость данных и возможность аналитической обработки архивов.

Схема функционирования системы представлена на рисунке.

Асинхронная архитектура Node.js обеспечивает неблокирующую обработку запросов и масштабируемость при увеличении количества активных соединений. Реактивный интерфейс React обновляет визуальные компоненты в режиме реального времени, что позволяет оператору видеть изменение технологических параметров без перезагрузки страницы.

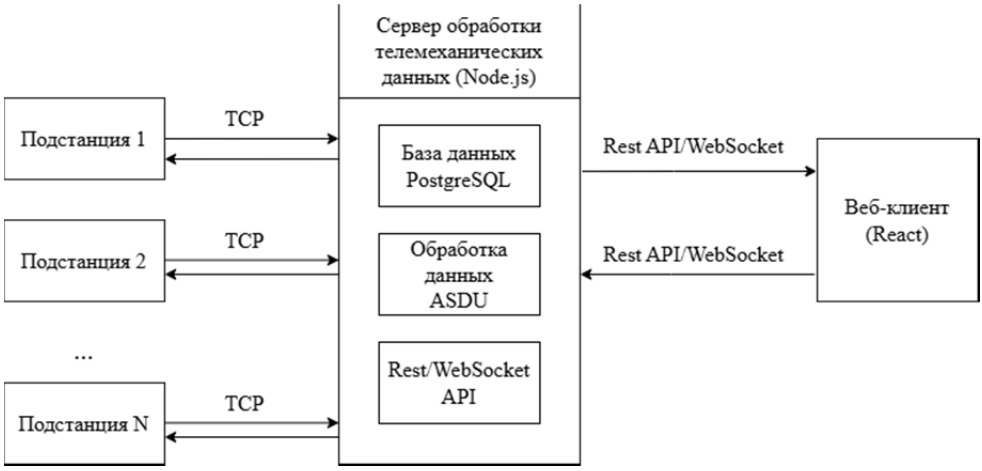


Схема функционирования системы передачи данных

Особое внимание уделено вопросам структурирования базы данных и обеспечения ее устойчивости. Использование PostgreSQL дает возможность реализовать временные ряды и триггеры событий, а также гибкую систему запросов для анализа параметров по времени и объектам.

Для оценки эффективности проведено моделирование работы системы с использованием эмуляторов подстанций, генерирующих поток сообщений ASDU. Полученные результаты показали устойчивость соединений и корректность обработки сообщений при непрерывной нагрузке. Среднее время отклика при интенсивности 500 кадров в секунду не превышало 60 мс, что удовлетворяет требованиям стандарта IEC 104 к оперативным каналам связи [5].

Дополнительно протестированы функции визуализации и фильтрации данных в интерфейсе оператора. Реакция интерфейса на поступление новых измерений составляла менее 100 мс, что обеспечивает эффект «живого» мониторинга.

Разработанная архитектура обладает рядом преимуществ:

– открытость и возможность интеграции с другими протоколами (SNMP, Modbus, MQTT);

– простота развертывания и кроссплатформенность компонентов;

– возможность масштабирования и использования в распределенных сетях;

– применимость для обучения и демонстрации принципов телемеханики.

Предложенная модель может быть использована для создания учебных лабораторных стендов, имитирующих работу систем диспетчерского управления, а также для разработки легких SCADA-платформ в энергетике и промышленности. При добавлении модулей безопасности (шифрование, аутентификация, контроль доступа) система может служить основой для прототипов промышленных решений.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что интеграция протокола IEC 60870-5-104 с современными веб-технологиями позволяет построить гибкую и надежную архитектуру для обмена и визуализации телемеханических данных. Разработанная модель сочетает принципы классических систем телемеханики с возможностями современных средств обработки информации, обеспечивая высокий уровень наглядности, надежности и доступности.

Список источников

[1] Лыков А.Н., Петроченков А.Б., Ромодин А.В. *Цифровые электроподстанции.* Пермь, ПНИПУ, 2024, 421 с.

[2] Малахова Т.Ф., Захаренко С.Г., Захаров С.А., Кудряшов Д.С. *Проектирование систем электроснабжения.* Кемерово, КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2019, 81 с.

[3] Бурков А.Т., Жемчугов В.Г., Степанова К.К. *Логические основы интеллектуальных технологий.* Санкт-Петербург, Лань, 2025, 372 с.

[4] Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. *Информационные системы в электроэнергетике.* Воронеж, ВГАУ, 2017, 233 с.

[5] Ковалев Р.А., Котеленко С.В. *Распределенная автоматизация и цифровизация в электроэнергетике.* Тула, ТулГУ, 2024, 223 с.

Development of a telemechanics system based on the IEC 60870-5-104 protocol

Krysin Ivan Alexandrovich ivan@bmstu.ru
Grishko Konstantin Alexandrovich grishkoka@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article considers a model of a client-server telemechanics system that provides the exchange of technological data according to the IEC 60870-5-104 standard. A software solution is presented that includes a server module on Node.js, the PostgreSQL database, and the React visualization web interface. It is shown that the use of the IEC 104 protocol makes it possible to implement reliable exchange between substation terminals and top-level systems with the possibility of visualization and control in real time. It is concluded that the developed architecture can be used to build distributed SCADA systems and telemechanics training stands.

Keywords: *telemechanics, IEC 104 protocol, server, visualization, SCADA, database, substation*

УДК 004.91

Разработка веб-приложения для коррекции и стандартизации почтовых адресов

Олейник Юрий Дмитриевич oleynikyud@student.bmstu.ru
Сидельников Артем Евгеньевич sidelnikovae@student.bmstu.ru
Галанкин Марк Сергеевич galankinms@student.bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

В настоящее время многие компании сталкиваются с проблемой нестандартизированных почтовых адресов в своих базах данных. Когда один и тот же адрес записан по-разному, это приводит к ошибкам, дублированию и осложняет автоматическую обработку информации, например, при рассылках или анализе. Предложено удобное программное решение, которое автоматически приводит такие адреса к единому корректному формату. Программа работает с популярными форматами файлов: Excel, PDF и Word. Она оснащена интуитивно понятным графическим интерфейсом, а для максимальной точности обработки использует современный и надежный сервис Dadata.

Ключевые слова: *обработка адресов, стандартизация данных, графический интерфейс, обработка файлов*

Во многих компаниях и государственных учреждениях адреса хранятся в разных форматах. Например, один и тот же адрес может быть записан как «ул. Ленина, д. 5», «улица Ленина, дом 5» или «Ленина, 5». Из-за этого сложно автоматически обрабатывать такие данные. Целью данной работы является автоматизация приведения почтовых адресов к единому стандарту. Для достижения поставленной цели было разработано веб-приложение, решающее следующие задачи:

– упорядочить базы данных почтовых адресов;
– ускорить обработку заказов в интернет-магазинах;
– упростить работу почтовых служб;
– улучшить качество данных в государственных реестрах.

Использованные технологии. Для разработки приложения были использованы следующие основные средства:

– Python — основной язык программирования;
– Streamlit — библиотека для создания веб-интерфейса страницы;
– Pandas — для обработки фрагментов данных, работы с таблицами [1, 2];
– Dadata API — для стандартизации и дополнения адресов [3];
– Tabula — для чтения и обработки PDF-файлов.

Описание работы программы. Программа включает в себя следующие модули.

1. Загрузчик файлов, интерфейс которого представлен на рис. 1. Программа распознает файлы разных форматов по расширению и обрабатывает их определенным образом [4]:

– Excel (.xlsx, .xls) — читает данные прямо из памяти, работая с фрагментами данных в виде структурированной таблицы;

– PDF — извлекает из документа таблицы с помощью библиотеки tabula;

– Word (.docx) — обрабатывает таблицы с помощью библиотеки python-docx.

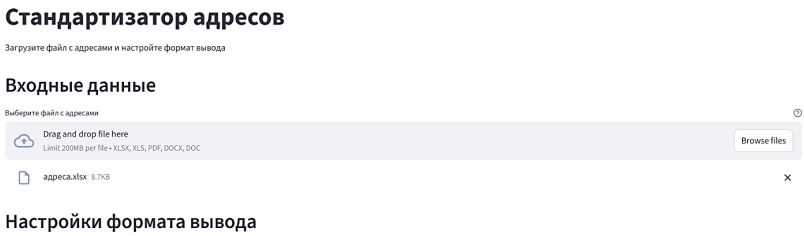


Рис. 1. Интерфейс загрузки файлов

Пользователю предоставляется возможность выбора формата для вывода данных с разными разделителями и регистром. Интерфейс программы на этом этапе представлен на рис. 2.

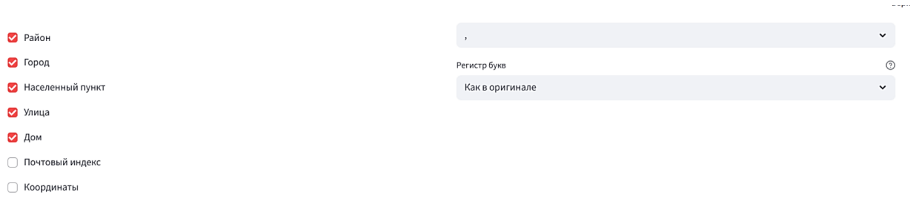


Рис. 2. Интерфейс настройки формата

2. Модуль поиска нужных колонок. Поиск происходит по словам-маркерам, которые внесены в словарь для работы программы. Она распознает в таблице заголовки с адресными данными и сопоставляет с ключами. В качестве входных данных могут приниматься разные названия, независимо от написания:

– для «района»: «район», «Район», «РАЙОН»;

– для «улицы»: «улица», «ул», «Улица», «УЛ».

3. Модуль обработки адресов. Обработка адресов осуществляется с помощью сервиса Dadata, где на основе API происходит стандартизация (согласно единым стандартам ФИАС) и дополнение по государственным справочникам (например, присоединяется кадастровый номер объекта, почтовый

индекс или координаты) [5]. Сервис также исключает дубли в таблицах и исправляет опечатки и грамматические ошибки.

4. Модуль создания и выгрузки Excel-файла. На рис. 3 представлен пример интерфейса получения результатов. Как видно из рисунка, он включает в себя набор адресов с различными ошибками и дубликатами, которые были стандартизованы с получением почтового индекса и координат.

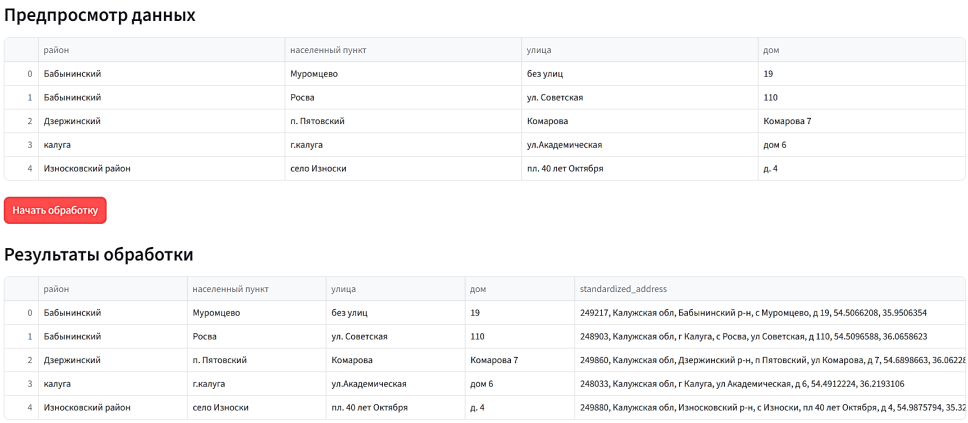


Рис. 3. Интерфейс получения результатов

Тестирование приложения. По окончании разработки приложения было проведено тестирование алгоритма на выборке из 200 случайных адресов, статистика которого представлена ниже:

– успешно обработано: 96 % (192 адреса);

– ошибки обработки: 4 % (8 адресов);

– среднее время обработки: 2–3 минуты.

Ошибки работы программы объясняются следующими факторами:

– несуществующие адреса. Программа не проверяет, является ли комбинация символов действительным адресом. По такой же причине не распознаются адреса, содержащие более 20 % опечаток;

– адреса из других стран. Dadata API использует только российские геоданные;

– многозначные адреса. Короткая запись «ул. Ленина, 19» указывает на здание более чем в сотне городов России;

– низкая скорость интернета, time-out ошибки (длительное ожидание ответа сервера).

Заключение. Разработанное приложение обладает следующими преимуществами:

– простота использования — приложение не требует специальных знаний и может быть понятно простому оператору;

– поддержка разных форматов — работает с Excel, PDF и Word, что может быть полезно при сборе данных с разных источников;

– гибкость — можно настроить формат вывода;

– кроссплатформенность — работает на Windows, Linux, macOS благодаря функционалу Streamlit

В приложении для стандартизации используется платный API DaData, что в дальнейшем планируется исправить с целью уменьшения финансовых затрат при использовании приложения. Планируется перейти к полностью бесплатной и самостоятельной альтернативе (Yandex API), а в перспективе — к собственной нейросетевой модели, обученной на базе данных почтовых адресов.

Список источников

[1] Коцюбинский К.А., Кузнецов Д.В. Исследование инструментов для анализа табличных данных в Python. *Дневник науки*, 2024, № 11(95), с. 1–10.

[2] Нгуен Ф.Х. Анализ данных на Python с применением Pandas и Matplotlib. *Экономика и управление: проблемы, решения*, 2024, т. 8, № 12(153), с. 91–97.

[3] Шмалько С.О., Клочева Е.А. Интеграция API для разработки сервиса подбора жилья для студентов. *Исследования молодежи — экономике, производству, образованию. XIV Всерос. молодеж. науч.-практ. конф.: сб. матер.* Сыктывкар, Сыктывкарский лесной институт, 2024, с. 134–136.

[4] Турышев Д.А. Парсинг и обработка данных с помощью языка программирования Python и табличного процессора Excel. *Молодежь XXI века: шаг в будущее. XXII Регион. науч.-практ. конф.: матер.* Благовещенск, Благовещенский гос. пед. ун-т, 2021, с. 788–789.

[5] Рымар Я.А., Прокопец А.Д., Чечетов К.А. О программном решении задачи обратного геокодирования. *Телекоммуникационные технологии: актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров в современных условиях. Всерос. (заочная) науч. конф. преподавателей, аспирантов и студентов: сб. матер.* Хабаровск, Хабаровский институт инфокоммуникаций, 2024, с. 374–378.

Development of a web application for correcting and standardizing email addresses

Oleynik Yuri Dmitrievich oleynikyud@student.bmstu.ru
Sidelnikov Artem Yevgenyevich sidelnikovae@student.bmstu.ru
Galankin Mark Sergeevich galankinms@student.bmstu.ru
Igor Vladimirovich Chukhraev chukhraev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

Currently, many companies face the issue of non-standardized postal addresses in their databases. When the same address is recorded in different ways, it leads to errors, duplication, and complicates the automatic processing of information, for instance, during mailouts or analysis. We offer a convenient software solution that automatically converts such addresses into a single, correct format. The program works with popular file formats: Excel, PDF, and Word. It is equipped with an intuitive graphical interface and uses the modern and reliable Dadata service for maximum processing accuracy.

Keywords: *address processing, data standardization, graphical interface, file processing*

УДК 004.514.6

Разработка BCI-системы управления курсором мыши на основе глазодвигательных артефактов электроэнцефалограммы

Мастыкаш Дмитрий Васильевич mastikash@bmstu.ru
SPIN-код: 7690-1112

Севастьянова Марина Александровна sevastyanova@bmstu.ru
SPIN-код: 4303-2620

Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru
SPIN-код: 5020-5127

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлена неинвазивная система управления курсором мыши на основе глазодвигательных артефактов электроэнцефалограммы. В отличие от традиционных подходов, где глазодвигательные артефакты считаются помехами и подавляются, в данной работе они целенаправленно используются как управляющие сигналы. Система распознает пять дискретных состояний: движение глаз влево, движение глаз вправо, моргание, зажмуривание и состояние покоя. Обработка сигнала включает полосовую фильтрацию, извлечение статистических и вейвлет-признаков, а также двухэтапную классификацию на основе линейного дискриминантного анализа. Точность распознавания в условиях кросс-валидации составила 92,3 %, а в реальном времени — 85 % успешных попыток при среднем времени выполнения задачи.

Ключевые слова: *интерфейс «мозг — компьютер», ЭЭГ, глазодвигательные артефакты, управление курсором, «Нейрон-Спектр-64», линейный дискриминантный анализ, ассистивные технологии*

Интерфейсы «мозг — компьютер» (ИМК) представляют собой технологии, позволяющие напрямую управлять внешними устройствами с помощью биоэлектрической активности мозга, что особенно актуально для людей с тяжелыми формами двигательных нарушений [1]. Неинвазивные ИМК, основанные на записи электроэнцефалограммы (ЭЭГ), являются наиболее распространенными из-за своей безопасности и доступности, однако сталкиваются с такими вызовами, как низкое соотношение сигнал/шум и необходимость длительной калибровки и обучения пользователя [2].

Альтернативным и перспективным направлением является использование глазодвигательных артефактов — сигналов, генерируемых при движениях глаз и моргании. Эти артефакты обладают значительно более высокой амплитудой по сравнению с нейронными компонентами ЭЭГ и интуитивно связаны с намерениями пользователя [3]. В то время как в классических методах обработки ЭЭГ такие артефакты устраняются с помощью методов типа ICA или фильтрации [4], в данной работе они рассматриваются как полезный управляющий сигнал.

Целью исследования является разработка и экспериментальная проверка BCI-системы управления курсором мыши на основе глазодвигательных артефактов, регистрируемых стандартными лобными ЭЭГ-каналами без использования специализированных EOG-электродов. Это повышает совместимость системы с коммерческими ЭЭГ-устройствами и упрощает ее применение в реальных условиях.

Эксперимент проводился с использованием электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-64» (Нейрософт, Россия) [5]. Регистрация осуществлялась с четырех лобных каналов: Fp1, Fp2, F7 и F8. Участник — мужчина, 21 год, без неврологических патологий. Запись проводилась вечером в звукоизолированном помещении для минимизации внешних помех, что согласуется с рекомендациями по снижению уровня артефактов [4].

В ходе эксперимента участник последовательно выполнял пять действий: смещение взгляда влево, вправо, произвольное моргание, сознательное зажмуривание и нахождение в состоянии покоя. Данные калибровочной сессии сохранялись в формате EDF и использовались для обучения модели. В тестовой фазе участник осуществлял онлайн-управление курсором мыши, наводя его на появляющиеся цели на экране.

Обработка сигнала включала следующие этапы. Во-первых, применялась полосовая фильтрация в диапазоне 0,3–10 Гц для подавления низкочастотного дрейфа и высокочастотного шума, что стандартно для анализа артефактов [4]. Затем сигнал пересэмплировался до 128 Гц для унификации частоты дискретизации. На этапе извлечения признаков использовались как статистические показатели (среднее значение, стандартное отклонение, максимум, минимум, размах), так и вейвлет-коэффициенты с применением вейвлета db4 на уровнях разложения 1 и 2, что позволяет эффективно выделять временные локальные особенности сигналов [6].

Классификация реализована в виде двухэтапной стратегии. На первом этапе бинарный детектор на основе линейного дискриминантного анализа (LDA) определяет факт моргания. Если моргание не обнаружено, сигнал передается во второй классификатор — четырехклассовый LDA, различающий движения глаз влево/вправо, зажмуривание и покой. Такой подход минимизирует ложные срабатывания, особенно при схожих амплитудных паттернах движений глаз [7].

Управление курсором осуществлялось с помощью библиотеки pyautogui, которая эмулирует движения мыши и клики на основе выходных меток классификатора. В тестовом режиме (20 попыток) система продемонстрировала 17 успешных наведений (85 %), среднее время выполнения задачи составило 2,2 с, а системная задержка — менее 350 мс. Ложные срабатывания зафиксированы в двух случаях, оба — в конце эксперимента, что, вероятно, связано с утомлением глаз. При кросс-валидации по участнику точность классификации достигла 92,3 ± 1,8 %.

Ключевым преимуществом предложенной системы является ее простота и эффективность. Использование LDA оказалось достаточным, поскольку

глазодвигательные артефакты линейно разделимы по полярности и амплитуде [7]. Отказ от специализированных EOG-электродов позволяет применять систему на большинстве существующих ЭЭГ-устройств [4]. Задержка менее 350 мс обеспечивает комфортное и интуитивно понятное управление, сопоставимое с традиционными интерфейсами.

Однако работа имеет и ограничения: отсутствие вертикального управления и необходимость индивидуальной калибровки модели под каждого пользователя. Эти недостатки типичны для ранних прототипов BCI-систем [2]. В будущем планируется расширение набора команд за счет вертикальных движений глаз и исследование методов трансферного обучения для снижения зависимости от калибровки. Тем не менее, полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенного подхода. Простота архитектуры, воспроизводимость и открытая программная реализация делают систему перспективной для применения в образовательных, исследовательских и, прежде всего, ассистивных целях [1, 3].

Список источников

[1] Уолпоу Дж.Р., Макфарланд Д.Дж. Многоканальная связь между мозгом и компьютером на основе ЭЭГ. *Электроэнцефалография. Клиническая нейрофизиология*, 1994, т. 90, с. 444–449.

[2] Лотте Ф. Обзор алгоритмов классификации для интерфейса «мозг — компьютер» на основе ЭЭГ. *J. Neural Eng.*, 2007, т. 4, с. R1–R13.

[3] Бареа Р. Кодификация движений глаз на основе электроокулографии для взаимодействия человека и компьютера. *ICRA*, 2002, с. 3356–3361.

[4] Фатуречи М. Артефакты ЭМГ и ЭОГ в системах интерфейса «мозг — компьютер». *Клиническая нейрофизиология*, 2007, т. 118, с. 480–494.

[5] *Нейрософт. Нейрон-Спектр-64: Руководство пользователя.* Иваново, 2021.

[6] Маллат С. *Вейвлет-тур по обработке сигналов.* Academic Press, 2008.

[7] Бишоп К.М. *Распознавание образов и машинное обучение.* Springer, 2006.

Development of a BCI mouse cursor control system based on oculomotor EEG artifacts

Mastykash Dmitry Vasilievich mastikash@bmstu.ru
SPIN-code: 7690-1112

Sevastyanova Marina Aleksandrovna sevastyanova@bmstu.ru
SPIN-code: 4303-2620

Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru
SPIN-code: 5020-5127

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article presents a non-invasive mouse cursor control system based on oculomotor electroencephalogram artifacts. Unlike traditional approaches, where oculomotor artifacts are considered interference and suppressed, in this work they are purposefully used as control

signals. The system recognizes five discrete states: eye movement to the left, eye movement to the right, blinking, closing and resting state. Signal processing includes bandpass filtering, extraction of statistical and wavelet features, as well as two-stage classification based on linear discriminant analysis. The recognition accuracy in cross-validation was 92.3%, and in real time it was 85% of successful attempts with an average task completion time.

Keywords: *BCI, EEG, eye-movement artifacts, cursor control, Neuron-Spectrum-64, Linear Discriminant Analysis, assistive technologies*

УДК 004

Исследование эффективности различных систем управления базами данных для хранения и анализа данных SNMP в задачах сетевого мониторинга

Ткаченко Анастасия Владимировна tkachenko_av@bmstu.ru
Ландаева Дарья Николаевна landaevadn@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена проблема выбора оптимальной базы данных для хранения и анализа SNMP-сообщений, поступающих от сетевых устройств. В исследовании реализована тестовая SNMP-система, включающая агента и менеджера, обменивающихся данными. Менеджер принимает сообщения и записывает их в три различные СУБД — TimescaleDB, InfluxDB и ClickHouse. Сравнение производительности проводилось по основным метрикам: скорости вставки данных, времени отклика на аналитические запросы и устойчивости при большом объеме данных.

Ключевые слова: *SNMP-сообщения, СУБД, TimescaleDB, InfluxDB, ClickHouse, мониторинг сети*

Современные системы мониторинга сетевого оборудования требуют высокой скорости обработки и анализа данных, поступающих в режиме реального времени. Протокол SNMP (Simple Network Management Protocol) широко используется для сбора информации о состоянии устройств [1], однако при масштабировании сетей возникает необходимость выбора оптимальной базы данных, обеспечивающей быструю запись, хранение и аналитическую обработку данных.

Цель данной работы — выбрать подходящую СУБД для интеграции с системой SNMP-агент — SNMP-менеджер с последующей целью анализа данных и выявления аномалий посредством методов машинного обучения. Для исследования были отобраны три современные СУБД, специализированные для работы с аналитическими нагрузками: TimescaleDB; InfluxDB; ClickHouse.

Для анализа мониторинга сетевого оборудования через SNMP важен выбор подходящих инструментов обработки данных. При построении системы SNMP-мониторинга необходимо учитывать, что SNMP-агент генерирует непрерывный поток сообщений (trap) в формате json, содержащего параметры устройства, приоритет события, местоположение и описание инцидента. Для надежного хранения и оперативного анализа этих данных требуется СУБД, способная обеспечить высокую производительность при работе с потоками информации. Среди наиболее перспективных решений выделяются.

TimescaleDB — расширение PostgreSQL, сочетающее реляционные возможности с оптимизацией для time-series [2]. Его гипертаблицы автоматически партиционируют данные по времени, а механизмы сжатия снижают объ-

ем хранилища. Система поддерживает сложные запросы с JOIN, подзапросами, оконными функциями и другими конструкциями, что позволяет легко связывать разнородные данные. Например, можно объединять SNMP-trap с данными инвентаризационной системы для комплексного анализа.

InfluxDB — специализированная СУБД, разработанная для метрик и событий [3]. Ee Line Protocol оптимизирован для приема SNMP-trap, а Continuous Queries позволяют автоматически агрегировать данные. Высокая скорость записи (тысячи операций в секунду) и встроенные инструменты анализа предоставляют базовые функции для расчета статистических показателей, интерполяции и фильтрации данных, хотя ограниченная поддержка сложных запросов может стать препятствием для глубокого анализа.

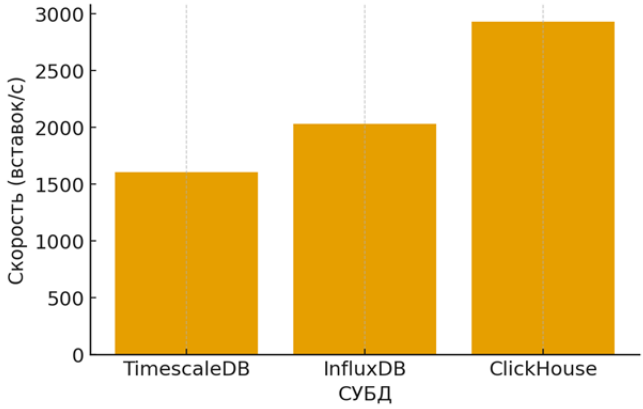
ClickHouse — колоночная СУБД для аналитических нагрузок, обеспечивающая экстремальную скорость запросов за счет векторизированной обработки и колочного хранения [4]. Она эффективно справляется с терабайтными объемами данных и позволяет проводить сложный анализ (например, корреляцию событий между устройствами), но требует тщательной настройки схемы и уступает InfluxDB в скорости записи.

Для того чтобы определить, какая СУБД является оптимальной, проведем тестирование трех решений — ClickHouse, TimescaleDB и InfluxDB. Каждая из них была развернута в контейнерах Docker [5], что обеспечило одинаковые условия тестирования. SNMP-агент генерировал 10000 сообщений в автоматическом режиме, содержащих параметры устройства, приоритет, местоположение и описание события. SNMP-менеджер принимал данные и записывал их во все три базы данных, фиксируя при этом время вставки и задержку выполнения. Для замеров использовались встроенные средства языка C# [6], что позволило оценить производительность по трем показателям: общее время вставки, средняя скорость и задержка. Результаты представлены в таблице ниже.

СУБД	Среднее время вставки, с	Скорость, вставок/с	Задержка p95, мс
TimescaleDB	6,24	1603	5,8
InfluxDB	4,92	2032	4,3
ClickHouse	3,41	2932	3,1

Тестирование показало различия в скорости обработки данных. TimescaleDB продемонстрировала стабильную скорость вставки при умеренной нагрузке, но при увеличении количества сообщений производительность снижалась. InfluxDB показала хорошие результаты на небольших объемах данных, однако скорость записи падала при росте нагрузки. ClickHouse продемонстрировала наилучшие показатели при пакетной вставке данных, что делает ее предпочтительной для задач анализа больших объемов SNMP-сообщений.

На рисунке представлено сравнительное распределение скорости вставки для трех СУБД. Видно, что ClickHouse опережает другие базы при объеме данных от 2000 записей и выше.



Сравнение скорости вставки данных в СУБД

Проведенное исследование показало, что выбор СУБД для системы на основе SNMP зависит от приоритетов проекта. Если важна совместимость с реляционными системами и поддержка SQL — рекомендуется использовать TimescaleDB. Для легких IoT-систем и временных рядов — InfluxDB. Если основной упор делается на анализ больших объемов данных и скоростную обработку — ClickHouse является наиболее эффективным решением. Таким образом, для задач анализа трафика и обнаружения аномалий в SNMP-сообщениях оптимальной базой данных в данном исследовании признана ClickHouse.

Список источников

[1] *Simple Network Management Protocol (SNMP).* URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3411 (accessed 25.10.2025).

[2] *TimescaleDB Docs.* URL: https://docs.timescale.com/ (accessed 25.10.2025).

[3] *InfluxData Documentation.* URL: https://docs.influxdata.com/ (accessed 25.10.2025).

[4] *Official ClickHouse Documentation.* URL: https://clickhouse.com/docs/ (accessed 25.10.2025).

[5] *Docker Documentation.* URL: https://docs.docker.com/ (accessed 25.10.2025).

[6] *Документация по C#.* URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/ (дата обращения 25.10.2025).

A study of the effectiveness of various database management systems for storing and analyzing SNMP data in network monitoring tasks

Tkachenko Anastsia Vladimirovna tkachenko_av@bmstu.ru
Landaeva Daria Nikolaevna landaevadn@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

This work addresses the problem of selecting an optimal database for storing and analyzing SNMP messages received from network devices. The study implements a test SNMP system comprising an agent and a manager that exchange data. The manager receives messages and writes them to three different DBMSs: TimescaleDB, InfluxDB, and ClickHouse. Performance comparison was carried out using key metrics: data insertion speed, response time for analytical queries, and stability under large data volumes.

Keywords: *SNMP messages, DBMS, TimescaleDB, InfluxDB, ClickHouse, network monitoring*

УДК 004.048

Обзор и анализ информационных потоков и функциональных задач, решаемых информационной системой небольшой кофейни

Склярова Маргарита Сергеевна margaritaskliarova@mail.ru
Вершинин Евгений Владимирович vershinin@bmstu.ru
Ильичев Владимир Юрьевич ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлен обзор и анализ информационных потоков и функциональных задач, решаемых информационной системой небольшой кофейни. Проведено исследование процесса сбора, хранения и обработки данных, которые являются результатом основных бизнес-процессов: приема заказов, управления запасами, финансовой отчетности и анализа продаж. На основе этого анализа предлагается модель структуры потока информации, отражающая логику взаимодействия между пользователями и подсистемами. Полученные результаты являются основой для дальнейшей разработки программного пакета для автоматизированного управления кофейней.

Ключевые слова: *информационная система, кофейня, бизнес-процессы, информационные потоки, автоматизация*

Перед созданием какой-либо информационной системы важным шагом является детальный анализ информационных потоков, циркулирующих в организации. Это особенно важно для небольшой кофейни, так как количество сотрудников невелико и все операции (прием заказов, подготовка, учет и отчетность) тесно взаимосвязаны. Неправильно организованные информационные потоки приводят к задержкам, ошибкам бухгалтерского учета и упущенной прибыли [1].

Поэтому целью исследования является классификация функциональных задач, определение структуры и характеристик обработки информации в кофейне и создание модели BPMN информационных потоков кофейни.

Методология исследования основана на принципах системного анализа, в том числе на моделировании бизнес-процессов; анализе источников и получателей информации; составлении структурных схем информационных потоков; классификации задач, решаемых системой.

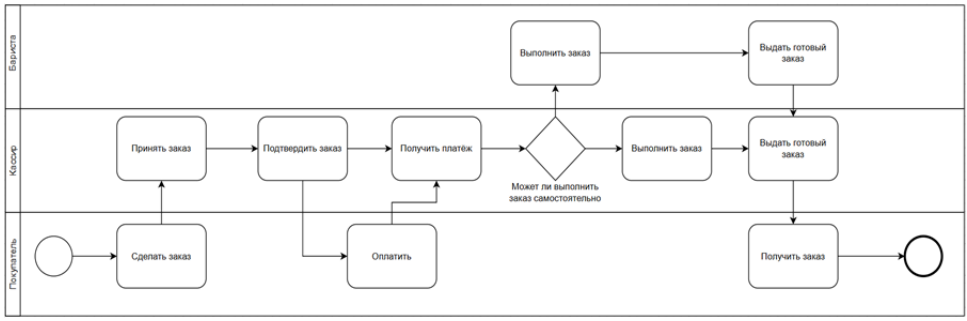
Объектом исследования является типичная кофейня с минимальным персоналом: администратор, бариста и кассир [2].

Основными сторонами обмена информацией являются: клиент, формирующий заказ; бариста, выполняющий заказ и фиксирующий его выполнение; информационная система, которая хранит данные, отслеживает запасы и формирует отчеты; администратор, использующий данные для анализа продаж, управления закупками и финансового учета.

Информационные потоки кофейни представляют собой поток данных между пользователями и системой во время процесса обработки заказов.

Входные данные включают информацию о заказах, платежах и списании ингредиентов, а выходные данные включают отчеты, статистику продаж и аналитические сводки [3].

На рисунке представлена схема информационных потоков, отражающая движение данных в логистической системе небольшой кофейни в нотации BMPM.



Модель BPMN информационных потоков кофейни

В этом сценарии участвуют покупатель, кассир и бариста. Процесс начинается с того, что покупатель заходит в кофейню и заказывает кофе или напиток, затем кассир принимает заказ и вводит информацию в компьютер. После этого кассир подтверждает заказ, и покупатель оплачивает покупку. После получения оплаты кассир должен решить, сможет ли он выполнить эту задачу самостоятельно или ее нужно поручить бариста. Этап принятия решения представлен в виде ромба, а две горизонтальные линии показывают возможные исходы. Если кассир решит, что может выполнить заказ, он может его выполнить, а если нет, то ему нужно поручить задачу второму сотруднику — бариста. Бариста готовит заказ и доставляет кофе клиенту. Завершающий этап — это когда клиент получает кофе и выходит из кофейни с чашкой в руке.

Чтобы кофейня работала эффективно, информационная система должна решать набор функциональных задач [4], классифицированных по назначению.

Оперативные задачи:

– регистрация заказов;

– отслеживание статуса выполнения;

– регистрация платежей и скидок.

Задачи бухгалтерского учета и анализа:

– учет запасов ингредиентов и расходных материалов;

– составление ежедневных и ежемесячных отчетов;

– мониторинг финансовых результатов.

Управленческие задачи:

– анализ динамики продаж по дням недели;

– определение самых популярных пунктов меню;

– поддержка решений о покупке.

Информационно-коммуникационные задачи:

– информирование сотрудников о заказах и оставшихся запасах;

– обмен сообщениями между бариста и администраторами;

– ведение истории заказов.

Важным результатом работы информационной системы является автоматическое создание отчетных документов [5].

Для эффективного управления кафе необходимо сформировать следующие формы отчетности:

– ежедневный отчет о продажах, содержащий количество заказов, средний чек и общий доход;

– отчет о запасах, отражающий потребление ингредиентов и прогнозы спроса;

– аналитические графики, показывающие динамику продаж по дням недели и категориям напитков.

Полученные данные позволяют администратору оптимизировать закупки, корректировать ассортимент и проводить экономический анализ деятельности кафе.

На основе анализа была изучена структура информационных потоков, определены источники и получатели данных и определены взаимодействия между участниками процесса. Результаты этого анализа легли в основу проектирования архитектуры информационной системы, обеспечивающей централизованную обработку данных, минимизацию потери информации и увеличение скорости принятия решений.

Для реализации системы предлагается использовать следующие инструменты обработки информации:

– ввод данных-регистрация заказов и платежей через интерфейс, созданный на Python (библиотека Tkinter), обеспечивающий удобный ввод информации о клиентах и заказах;

– обработка данных-обновление информации об инвентаризации, расчет доходов и хранение заказов в базе данных с использованием модулей Python (sqlite3, pandas);

– хранение данных организация централизованного репозитория на основе SQLite, который не требует отдельного сервера и подходит для небольшого кафе;

– вывод данных-формирование отчетов и аналитических графиков с использованием библиотек pandas и matplotlib, позволяющих экспортировать в форматы CSV и PDF.

В результате была разработана модель информационных потоков и классификация функциональных задач — основа для создания автоматизированной системы управления кафе. Такая система повышает эффективность предприятия, обеспечивает прозрачность бизнес-процессов и создает надежную базу для дальнейшего развития и расширения предприятия.

Список источников

[1] Егоян Э.А., Логунова Н.Ю. Моделирование и анализ бизнес-процессов предприятий общественного питания. *Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2021). Всерос. науч. конф. молодых исследователей с междунар. уч.: матер.* Москва, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, 2021, с. 98–104.

[2] Юхтина Т.И. Автоматизация кафе и ресторанов: цифровые технологии и системы для сервиса, управления и учета. *Информационная среда в современной России: риски и возможности. Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Санкт-Петербург, Азбука, 2020, с. 156–158.

[3] Савченко Н.В. Автоматизация ресторана и кафе: системы и программы для работы, управления, учета. *Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение.* Донецкий междунар. науч. круглый стол*: матер.* Донецк, Институт проблем искусственного интеллекта, 2023, с. 188–191.

[4] Федякова Н.Н., Кирюхина И.А. Автоматизированная система управления iiko в помощь ресторанному бизнесу. *Экономика и социум*, 2015, № 6-1(19), с. 899–901.

[5] Федоренко А.Ю., Маторин С.И. Анализ подходов к автоматизации учета товаров на точках продаж. *Информационно-аналитические системы и технологии. XI Междунар. науч.-практ. и науч.-методич. конф.: матер.* Белгород, БУКЭП, 2024, с. 143–51.

Review and analysis of information flows and functional tasks solved by the information system of a small coffee shop

Sklyarova Margarita Sergeevna margaritaskliarova@mail.ru
Vershinin Evgeny Vladimirovich vershinin@bmstu.ru
Ilyichev Vladimir Yurievich ilyichev.vyu@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper presents an overview and analysis of information flows and functional tasks solved by the information system of a small coffee shop. The study examines the processes of collecting, storing, and processing data that arise during the execution of key business functions, such as order processing, inventory management, financial reporting, and sales analysis. Based on this analysis, a model of the information flow structure is proposed, which reflects the logic of user and subsystem interactions. The obtained results serve as a basis for the subsequent development of a software package that provides automation of coffee shop management.

Keywords: *information system, coffee shop, business processes, information flows, automation*

УДК 004.85

Методика обучения нейронных сетей архитектуры Transformers для решения задач распознавания почерка

Тихонов Никита Александрович tikhonovna@student.bmstu.ru
SPIN-код: 1515-2652
Савельев Тимофей Геннадьевич savelevtg@student.bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлена инновационная методика обучения нейронных сетей на архитектуре Transformers для задачи распознавания рукописного текста. Предложен каскадный подход, включающий четыре этапа: начальное обучение на разнородных данных, формирование сбалансированных выборок, циклическое дообучение и валидацию с контролем метрик CER и WER. Особое внимание уделено работе с разными типами данных — от качественных рукописных образцов до зашумленных медицинских записей. Эксперименты показали улучшение качества распознавания по сравнению с моделью raxtemur/trocr-base-ru. Методика эффективно фиксирует локальные и глобальные особенности почерка, повышая устойчивость к вариативности.

Ключевые слова: *нейронные сети, Transformers, распознавание почерка, HTR, обучение нейронных сетей, каскадное обучение, CER, WER, компьютерное зрение, машинное обучение*

В области компьютерного зрения и обработки документов задача распознавания рукописного текста остается одной из наиболее сложных и актуальных. Современные подходы к решению этой задачи все чаще используют нейронные сети, созданные с использованием архитектуры Transformer, включая image Transformer для выделения визуальных элементов и text Transformer для языкового моделирования [1], которые демонстрируют высокую эффективность благодаря механизму внимания, позволяющему учитывать глобальные зависимости в данных. Однако успешное применение таких моделей требует разработки специализированных методик обучения, адаптированных к особенностям задачи и доступных данных.

Целью настоящего исследования является разработка и апробация методики обучения нейронной сети на основе архитектуры Transformers для задачи распознавания рукописного текста. Основное внимание уделяется стратегии обучения, которая позволяет последовательно наращивать качество модели через систему итераций и контрольных точек.

Для корректного использования данной методики понадобится специальная структура датасетов, в конкретном примере, описанном в этой статье будет использовано 5 разных. Нехватка больших наборов рукописных данных с аннотациями является серьезным препятствием для разработки систем распознавания [2].

Первый набор данных — предобработанные, самостоятельно сгенерированные рукописные изображения, представленные в высоком качестве. Второй — набор русских рукописных почерков, включающий в себя большое количество уникальных почерков на различные тематики с низким уровнем зашумленности фотографий. Третий — предобработанные изображения отдельных букв алфавита. Четвертый — изображения медицинского почерка с низким качеством и высоким уровнем зашумленности. Пятый — изображения почерка в высоком качестве и низким уровнем зашумленности.

Предобработка исключает все зашумленности, неточности и, в случае с отдельными буквами, удаление фона полностью.

На первой итерации осуществляется первоначальное обучение модели на всех доступных датасетах, что позволяет заложить базовые представления о разнообразии рукописных стилей. Этот этап служит фундаментом для последующего обучения, обеспечивая начальную инициализацию весов модели.

Вторая итерация методики направлена на формирование сбалансированного набора данных для последующего обучения. Исходные датасеты разбиваются на блоки фиксированного размера по 1024 строки каждый, после чего формируется несколько объединенных датасетов, содержащих равномерное представление данных из всех источников. Такой подход позволяет решить проблему распределения данных и обеспечить сбалансированное обучение модели.

Третья итерация представляет собой процесс обучения модели на сформированных наборах данных.

Четвертая итерация нужна для проверки модели и сохранения наилучших ее версий. Ключевой особенностью итерации является система контроля качества, основанная на вычислении метрик Character Error Rate и Word Error Rate после каждой эпохи обучения. Метрика CER характеризует точность распознавания отдельных символов, WER отражает точность распознавания целых слов. На данной итерации формируется 2 условия:

– если CER меньше 95 %, сохранить модель и повторить цикл начиная с 1 итерации, если после 3 циклов целевая метрика достигнута не была, значит данных на итерации недостаточно, или же они были подобраны неверно;

– если WER ниже 10 % повторить итерацию 3 до достижения целевой метрики.

Экспериментальная проверка предложенной методики продемонстрировала ее высокую эффективность. Проведенное сравнение с эталонной моделью raxtemur/trocr-base-ru показало значительное улучшение метрик качества. Значение CER было снижено с 7,67 до 4,07, показатель WER снизился с 26,32 до 14,32. Такое существенное улучшение характеристик подтверждает эффективность предложенного подхода к обучению.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная методика позволяет не только улучшить точность распознавания, но и повысить устойчивость модели к вариациям рукописного текста. Снижение ошибок распознавания как на уровне отдельных символов, так и на уровне целых

слов подтверждает перспективность использования данной методики обучения для задач компьютерного зрения.

Несмотря на высокую точность работы со структурированными документами, традиционные приложения, основанные на распознавании текста, подвержены ошибкам при обработке сложных или нестандартных документов [3]. Это говорит нам о том, что сеть можно будет продолжать совершенствовать и всегда есть точка роста.

Важным преимуществом предложенного подхода является его универсальность — методика может быть адаптирована для обучения различных нейронных сетей данной архитектуры, ориентированных на обработку последовательностей. А главное в отличие от других архитектур, эта эффективно фиксирует локальные (например, стили символов, лигатуры) и глобальные (например, ширину чернил, наклон) зависимости в изображении, демонстрируя самую современную производительность для задач распознавания текста, таких как распознавание печатного и рукописного текста, без необходимости выполнения сложных этапов предварительной или последующей обработки [4]. Данное отличие является ключевым при выборе данной методики в сочетании с данной архитектурой.

Список источников

[1] Li M., Lv T., Cui L., Lu Y., Florencio D., Zhang C., Li Z., Wei F. *TrOCR: Transformer-based Optical Character Recognition with Pre-trained Models.* URL: https://arxiv.org/pdf/2109.10282 (accessed 22.10.2025).

[2] Sánchez-Nielsen E., Martín-Herrera I. Transformer-Based OCR System for Handwritten Signature Verification in Lawmaking Petitions: A Proof of Concept. *IEEE Access*, 2025, vol. 13, pp. 177573–177594. https://doi.org/10.1109/access.2025.3620686

[3] Patel D. Comparing Traditional OCR with Generative AI-Assisted OCR: advancements and applications. *International Journal of Science and Research (IJSR),* 2025, vol. 14, no. 6, pp. 347–351. https://doi.org/10.21275/sr25603211507

[4] Adeli Shamsabad M., Suen C. Automated Handwriting Pattern Recognition for Multi-Level Personality Classification Using Transformer OCR (TrOCR). *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM),* 2025. https://doi.org/10.5220/0013318800003905

Training methodology for transformer architecture neural networks for handwriting recognition tasks

Tikhonov Nikita Alexandrovich tikhonovna@student.bmstu.ru
SPIN-code: 1515-2652

Savelev Timofei Gennadivich savelevtg@student.bmstu.ru

Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The article presents an innovative training methodology for neural networks based on the Transformer architecture for the task of handwritten text recognition. A cascaded approach

is proposed, including four stages: initial training on heterogeneous data, formation of balanced datasets, cyclic fine-tuning, and validation with CER and WER metric control. Special attention is given to handling various data types — from high-quality handwritten samples to noisy medical records. Experiments demonstrated improved recognition accuracy compared to the raxtemur/trocr-base-ru model. The methodology effectively captures both local and global handwriting features, enhancing robustness to variability.

Keywords: *neural networks, Transformer, handwriting recognition, HTR, neural network training, cascade training, CER, WER, computer vision, machine learning*

УДК 004.85

Модуль интеллектуального фаззинг-тестирования на основе обучения с подкреплением

Ворона Кирилл Максимович voronakm@student.bmstu.ru
Сторожук Вадим Александрович sva23ki237@student.bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрено разработанное решение для повышения эффективности поиска crash-багов и ошибок времени выполнения путем генерации осмысленных, а не случайных тестовых данных. Представлено использование модуля на основе обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) для генерации новых тестовых данных, максимизирующих вознаграждение, например достижение нового покрытия кода или провокацию сбоя. Показано, что модуль можно использовать для стресс-тестирования функций, работающих с входными данными. Сделаны выводы, что разработанный модуль интеллектуального фаззинг-тестирования на основе RL значительно повышает скорость и точность обнаружения уязвимостей.

Ключевые слова: *фаззинг, обучение с подкреплением, генерация тестовых данных, покрытие кода, уязвимости*

Фаззинг (fuzzing) — это метод динамического анализа программного кода, направленный на выявление уязвимостей и ошибок времени выполнения путем подачи некорректных или искаженных данных в программу. Традиционные методы фаззинга, такие как случайное генерирование тестовых данных, часто неэффективны, так как большинство сгенерированных входов отбрасывается на ранних этапах выполнения программы, не достигая критически важных и уязвимых участков кода. Для повышения эффективности фаззинга активно используются методы искусственного интеллекта (ИИ), в частности обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL).

Целью исследования является разработка модуля интеллектуального фаззинг-тестирования на основе RL, который будет интегрирован в комплексную платформу для динамического анализа программ на Python. Модуль предназначен для генерации осмысленных, а не случайных тестовых данных, что позволит повысить скорость и точность выявления уязвимостей.

Модуль принимает на вход целевую программу и начальный набор тестовых данных. Агент RL (например, на основе Q-learning или Policy Gradients) учится генерировать новые тестовые данные, максимизируя «вознаграждение», например достижение нового покрытия кода (code coverage) или провокацию сбоя. Модель RL формализует процесс фаззинга как марковский процесс принятия решений (Markov Decision Process, MDP), где состояние — текущий тестовый вход, действие — операция мутации (например, замена байта, вставка токена, перестановка блоков), а награда — метрика,

отражающая прогресс тестирования (например, новое покрытие кода, обнаружение краша, увеличение времени выполнения).

Эксперименты показывают, что использование модуля RL-фаззинга значительно превосходит случайные и эвристические стратегии по скорости нахождения уникальных крашей и покрытию кода. Например, в исследовании Böttinger et al. было продемонстрировано, что использование глубоких нейросетей (например, DQN, DDPG) для аппроксимации функции ценности действий (Q-function) или стратегии (policy) позволяет учитывать сложные зависимости между входными данными и поведением целевой программы, обучать агента на основе обратной связи от выполнения программы (покрытие, краши, тайм-ауты) и динамически адаптировать стратегию мутации в зависимости от контекста (например, выбирать более агрессивные мутации для редко покрываемых путей) [1].

Для оценки качества мутаций используется комбинированная информация о покрытии и вероятности уязвимостей. Например, в VSGFuzz используется граф встраивания (graph embedding) для оценки уязвимости функций на основе их структуры (ACFG), базовые блоки получают веса, зависящие от их «уязвимости» и сложности достижения, и итоговая награда за тестовый вход — сумма весов пройденных блоков плюс бонус за краш. Это позволяет направлять поиск не просто на «новые» пути, а на потенциально опасные участки кода, повышая релевантность найденных багов [2].

Модуль RL-фаззинга особенно эффективен в доменах с жесткими структурными ограничениями, таких как компиляторы и протоколы, где случайные мутации почти всегда отклоняются. RL-агенты, напротив, обучаются на успешных мутациях и учатся вносить изменения внутри допустимого синтаксиса, сохраняя валидность, но нарушая семантику, например, вызывая переполнения, деление на ноль или неинициализированные переменные. Это повышает эффективность поиска багов в глубоких слоях обработки [3].

Примером реализации модуля RL-фаззинга является FuzzBoost, который использует глубокое обучение (Deep Q-learning) для генерации синтаксически и семантически валидных тестовых данных. Модуль FuzzBoost учится выбирать оптимальные действия мутации, максимизируя вознаграждение, которое зависит от покрытия кода и времени выполнения. Эксперименты показали, что FuzzBoost значительно улучшает покрытие кода и скорость обнаружения уязвимостей по сравнению с традиционными методами фаззинга [4].

В основе модуля лежал следующий подход.

Обработка данных. Для анализа программы использовался метод ACFG, который преобразует код в граф потоков управления. Каждому элементу графа (базовому блоку) присваивался числовой вектор, характеризующий его структуру. Это позволяло нейросети оценивать потенциальную «уязвимость» различных участков кода.

Алгоритм RL. В качестве алгоритма обучения с подкреплением был выбран Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG). Данный алгоритм хорошо

подходит для задач с непрерывным пространством действий. Модель состояла из двух основных компонентов:

– Актор (Actor) — выбирал действие (вариант мутации входных данных) на основе текущего состояния программы;

– Критик (Critic) — оценивал, насколько выбранное действие было эффективным, предсказывая потенциальное вознаграждение.

Оценка мутаций. Качество сгенерированных тестовых данных оценивалось по метрикам покрытия кода (количество пройденных базовых блоков) и факту возникновения сбоя (краша).

Модуль был реализован на языке Python. В ходе тестирования была выявлена его принципиальная работоспособность, однако эффективность оказалась ниже ожидаемой. Основные трудности, с которыми столкнулась разработка, заключаются в следующем.

Разреженность наград. Критически важные события (обнаружение краша или нового участка кода) происходят крайне редко. Из-за этого модель не получает достаточной обратной связи для эффективного обучения и медленно сходится.

Высокая вычислительная сложность. Обучение нейросетей в алгоритме DDPG требует значительных вычислительных ресурсов и времени, что затрудняет его практическое применение для анализа сложных программ.

Проблема обобщаемости. Модель, обученная на одной тестовой программе, плохо переносилась на другие, требуя ресурсоемкого процесса дообучения для каждого нового объекта тестирования.

Проведенная работа подтвердила теоретическую возможность применения обучения с подкреплением для интеллектуального фаззинга. Однако на практике реализация столкнулась с фундаментальными проблемами, характерными для RL: разреженностью наград, высокими вычислительными затратами и слабой обобщающей способностью модели. Преодоление этих ограничений требует дальнейших исследований, таких как применение более эффективных методов исследования среды (например, Thompson Sampling) и использование техник transfer learning для повышения универсальности модели.

Список источников

[1] Böttinger K., Godefroid P., Singh R. Deep Reinforcement Fuzzing. *IEEE Security and Privacy Workshops (SPW),* 2018, pp. 116–122. https://doi.org/10.1109/SPW.2018.00026

[2] Zhang Z., Cui B., Chen C. Reinforcement Learning-Based Fuzzing Technology. Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1195, pp. 243–256. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50399-4_24

[3] Chen Y.C., Yi Y.H., Chew C.J., Lee J.S. Preserving the Higher Coverage Guided of an ICS-Oriented Fuzzy Testing Technique. *Security and Information Technologies with AI, Internet Computing and Big-data Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2025, vol. 410, pp. 3745–3756. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7786-0_34

[4] Liu X., Li X., Prajapati R., Wu D. DeepFuzz: Automatic Generation of Syntax Valid C Programs for Fuzz Testing. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2019, vol. 33, no. 01, pp. 1044–1051. https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33011044

Module of intelligent fuzzing testing based on reinforcement learning

Vorona Kirill Maximovich voronakm@student.bmstu.ru
Storozhuk Vadim Alexandrovich sva23ki237@student.bmstu.ru
Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper presents a solution to improve the efficiency of finding crash bugs and runtime errors by generating meaningful, rather than random, test data. The use of a module based on reinforcement learning (RL) for generating new test data, maximizing rewards such as new code coverage or provoking crashes, is described. It is shown that the module can be used for stress-testing functions that work with input data. The conclusions drawn indicate that the developed module for intelligent fuzzing based on RL significantly enhances the speed and accuracy of vulnerability detection.

Keywords: *fuzzing, reinforcement learning, test data generation, code coverage, vulnerabilities*

УДК 004.852

Оптимизация подбора гиперпараметров и методов обучения YOLO V8

Павлов Игорь Владимирович piv23ki184@student.bmstu.ru
Джанаев Карим Сергеевич dzhanaevks@student.bmstu.ru
Чухраев Игорь Владимирович chukhraev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрена методика обучения детекторов объектов на архитектуре YOLOv8 с адаптивной настройкой гиперпараметров по визуальным характеристикам изображений. Представлен эволюционный подход, включающий анализ признаков, многоуровневую оптимизацию и валидацию по метрикам mAP@0.5 и устойчивости. Показано, что метод повышает точность детекции и сходимость, что делает его эффективным для данных с вариативным фоном.

Ключевые слова: *YOLOv8, детекция объектов, гиперпараметры, эволюционная оптимизация, компьютерное зрение, mAP, адаптивное обучение, визуальные характеристики, пищевые продукты*

Задача детекции объектов на изображениях с вариативным фоном остается одной из наиболее сложных в области компьютерного зрения. Современные архитектуры семейства YOLO демонстрируют высокую эффективность, однако их успешное применение требует точного подбора гиперпараметров, что существенно усложняет внедрение метода пользователями без глубоких знаний в области машинного обучения [1]. Ошибки при выборе параметров, таких как скорость обучения, степень регуляризации или конфигурации аугментаций, приводят к нестабильной сходимости, переобучению и снижению точности. Это делает актуальной задачу автоматизации подбора гиперпараметров с учетом особенностей входных данных и свойств конкретной задачи.

Цель данного исследования — разработка и апробация методики обучения детектора YOLOv8 с адаптивной настройкой гиперпараметров, ориентированной на визуальные характеристики объектов и фоновых областей. Предложенный подход сочетает идеи эволюционной оптимизации и анализа визуальных признаков, что позволяет минимизировать ручное вмешательство, ускорить процесс обучения и обеспечить устойчивость сходимости на данных различной природы.

Для экспериментальных исследований использовались специализированные датасеты сегментации пищевых продуктов с вариативным фоном и сложными текстурами объектов. Предварительная обработка данных включала шумоподавление, выравнивание фона, выделение контуров и вычисление статистических признаков цветовых распределений. Такой подход позволил повысить чувствительность модели к изменению гиперпараметров и улучшить начальную инициализацию обучения [2].

Методика реализует эволюционный подход и включает четыре последовательные итерации.

Итерация 1 — анализ визуальных характеристик. Пользователь через графический интерфейс определяет доминирующие цвета, текстурные особенности и области интереса. Система извлекает статистические признаки и формирует начальное пространство поиска гиперпараметров.

Итерация 2 — эволюционная оптимизация. Создается популяция конфигураций гиперпараметров (тип оптимизатора, скорость обучения, интенсивность аугментаций). Для оценки пригодности решений используется функция:

$$F = 0.8 \times mAP@0.5 + 0.2 \times \left(1 - \sigma(\text{loss}_{validation})\right), \qquad (*)$$

где σ— стандартное отклонение валидационных потерь. Как видно из формулы (*), подход одновременно учитывает точность детекции и стабильность сходимости [3].

Итерация 3 — многоуровневая оптимизация. На ранних этапах выполняется грубый поиск, затем диапазоны гиперпараметров автоматически сужаются. При признаках переобучения система корректирует скорость обучения и параметры регуляризации, используя динамику изменения функции потерь [1].

Итерация 4 — валидация и корректировка. После каждой эпохи вычисляются показатели mAP@0.5 и стабильность обучения. Если mAP@0.5 не превышает 5 % после трех эпох, пространство поиска расширяется и цикл повторяется. При снижении стабильности ниже 85 % система уменьшает learning rate и усиливает регуляризацию [2].

Результаты экспериментов показали, что предложенная методика повышает mAP@0.5 на 7–12 %, увеличивает устойчивость сходимости до 92 %, а время подбора параметров сокращает в 3–5 раз по сравнению с ручной настройкой [2]. Кроме того, зафиксировано более стабильное распределение градиентов и снижение колебаний функции потерь, что свидетельствует о повышении надежности обучения.

Разработанная система позволяет эффективно адаптировать гиперпараметры под визуальные особенности данных, учитывать локальные характеристики объектов и глобальные свойства сцены. Методика может быть интегрирована в системы автоматизированного обучения нейронных сетей и применяться для промышленных, медицинских и исследовательских задач, где требуется высокая точность детекции при ограниченных ресурсах [4]. В перспективе алгоритм может быть расширен для работы с архитектурами сегментации и трекинга, что открывает возможности для построения полностью адаптивных систем компьютерного зрения нового поколения.

Список источников

[1] Черкасова И.С. Оптимизация гиперпараметров нейронной сети и снижение вычислительных затрат. *Информационные технологии*, 2022, № 5, с. 45–52.

[2] Самойлова Т.А. Сравнительный анализ оптимизации гиперпараметров средствами Optuna и Hyperopt для сверточных нейронных сетей. *Системы и технологии информационного общества (SITITO)*, 2024, т. 20, № 3, с. 36–43.

[3] Wasudeorao K., Prasad K. Evolutionary algorithms for hyperparameter optimization in machine learning for application in high energy physics. *Eur. Phys. J. C*, 2021, vol. 81, no. 170. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-08932-1

[4] Смирнова В.С., Шаламов В.В., Ефимова В.А., Фильченков А.А. Оптимизация гиперпараметров на основе объединения априорных и апостериорных знаний о задаче классификации. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2020, т. 20, № 6, с. 828–834.

Optimization of hyperparameter selection and training methods for YOLO V8

Pavlov Igor Vladimirovich piv23ki184@student.bmstu.ru
Dzhanaev Karim Sergeevich dzhanaevks@student.bmstu.ru
Chukhraev Igor Vladimirovich chukhraev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper presents a method for training object detectors based on the YOLOv8 architecture with adaptive hyperparameter tuning according to visual image characteristics. An evolutionary approach including feature analysis, multilevel optimization, and validation by mAP@0.5 and stability metrics is described. The method improves detection accuracy and convergence, proving effective for data with variable backgrounds.

Keywords: *YOLOv8, object detection, hyperparameters, evolutionary optimization, computer vision, mAP, adaptive learning, visual characteristics, food products*

УДК 004.94

Исследование возможностей микроконтроллера Raspberry Pi Pico и разработка аппаратно-программного комплекса на его базе

Дроздова Татьяна Александровна tatiana.d00@mail.ru
Гордеева Анастасия Эдуардовна nastya.gordeeva04@mail.ru
Трешневская Вероника Октавиановна treshnevskaya@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрен процесс исследования и проектирования модулей аппаратно-программного комплекса на базе микроконтроллера Raspberry Pi Pico в среде Wokwi. Описана структура системы, обмен данными между измерительным и исполнительным блоками и принципы взаимодействия через UART-интерфейс. Приведены результаты экспериментов по передаче данных и обработке сигналов от датчиков DHT22 и LDR. Сделаны выводы о возможностях Raspberry Pi Pico в учебных проектах и задачах автоматизации производственных процессов.

Ключевые слова: *Raspberry Pi Pico, микроконтроллер, Wokwi, датчик температуры, UART, автоматизация, аппаратно-программный комплекс*

Современные тенденции стремительного роста рынка встраиваемых систем и интернета вещей предъявляют высокие требования к надежности, скорости передачи информации и экономической эффективности решений. Возникает необходимость создания недорогих, но производительных систем, способных обеспечивать высокоточный сбор и обработку данных и оперативное управление в режиме реального времени, а также сохранение заданного уровня надежности функционирования без деградации ключевых показателей.

В этом контексте особую актуальность приобретают массовые платформы на базе микроконтроллеров, такие как Raspberry Pi Pico. Его производительная двухъядерная архитектура и энергоэффективность делают его перспективным фундаментом для создания унифицированных комплексов автоматизации [1]. При проведении сравнительного анализа с популярными платами семейства Arduino было установлено, что Raspberry Pi Pico обеспечивает существенно более высокую тактовую частоту обработки данных и имеет встроенную поддержку настоящей многозадачности [2]. Данное сочетание характеристик делает его оптимальным фундаментом для создания как учебных, так и практических прикладных комплексов в области автоматизации и сбора данных.

Основной целью данной работы выступает комплексная разработка и последующее исследование двух функционально взаимосвязанных модулей унифицированного аппаратно-программного комплекса, построенного на базе платформы Raspberry Pi Pico. Первый из модулей предназначен для выполнения функций точного измерения ключевых внешних параметров окружающей среды, таких как температура и уровень освещенности. Второй

модуль отвечает за реализацию управления исполнительными устройствами и механизмами, действуя в строгом соответствии с данными, полученными от первого модуля.

В рамках разработанной системы для измерения температуры и влажности воздуха применяется цифровой датчик DHT22, а для контроля уровня освещенности используется фоторезистор LDR. Аналоговые сигналы от датчиков преобразуются в цифровую форму с помощью встроенного в микроконтроллер 12-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), после чего полученные данные передаются между модулями по высокоскоростному последовательному интерфейсу UART с фиксированной скоростью 115–200 бит/с [3]. Для значительного повышения точности и надежности измерений был реализован и применен специализированный алгоритм цифровой фильтрации, основанный на усреднении множества отсчетов с обязательным отбрасыванием экстремальных значений. В случае фиксации превышения заранее заданных пользователем пороговых значений в системе автоматически генерируется событие тревоги, которое немедленно передается во второй управляющий модуль в виде структурированного кадра данных [4]. Проведенный серийный экспериментальный анализ продемонстрировал, что итоговая ошибка измерения температуры не превышает значения ±0,2 °C, а погрешность определения уровня освещенности находится в пределах ±3 % от измеряемой величины.

Второй управляющий модуль выполняет функции логического управления подключенными исполнительными устройствами, основываясь на командах и данных, поступающих с первого контроллера. Например, при регистрации повышения температуры воздуха выше установленного порога в 25 °C автоматически включается сигнальный светодиод, индицирующий «нагрев», а при обнаружении недостаточного уровня освещенности — активируется лампа дополнительного освещения. Для обеспечения максимальной целостности и достоверности передаваемой информации обмен данными между модулями осуществляется с применением контроля четности и последующей CRC-проверкой (Cyclic Redundancy Check) [5], что практически полностью исключает риск незамеченных искажений, особенно при работе на высоких скоростях передачи. Измерения показали, что средняя задержка взаимодействия между модулями в системе составляет около 10 мс, что полностью соответствует строгим требованиям систем реального времени.

Программная часть комплекса была написана на языке программирования C/C++ с активным использованием официального Pico SDK и стандартных библиотек для низкоуровневой работы с интерфейсами UART, портами ввода-вывода GPIO и системными таймерами. Для поэтапной отладки и верификации логики работы применялась виртуальная среда моделирования Wokwi [6]: изначально проводилось тестирование корректности работы датчиков [7], затем — отладка протокола обмена данными, и на заключительном этапе — полная интеграция модулей. Как наглядно продемонстрировано в работе, применение виртуального моделирования в среде Wokwi позволяет

сократить общее время цикла отладки проекта на 30–40 % по сравнению с традиционной работой с физическим прототипом. Проведенные комплексные испытания и нагрузочное тестирование подтвердили, что система стабильно функционирует при значительной нагрузке, достигающей 100 полных циклов обновления данных в секунду, без какой-либо потери информационных пакетов. Передача и прием данных по интерфейсу UART не вызывали сбоев или нештатных ситуаций даже при целенаправленном введении в канал связи искусственных помех, создающих до 5 % битовых ошибок в передаваемом потоке, что является убедительным подтверждением высокой надежности реализованного алгоритма связи. Проведенный анализ архитектуры показал, что схема «два модуля — два контроллера» не только позволяет гибко масштабировать комплекс путем добавления новых узлов, но и обеспечивает повышенную общую устойчивость системы к возможным сбоям отдельных компонентов.

Таким образом, разработанный аппаратно-программный комплекс на базе Raspberry Pi Pico продемонстрировал высокую эффективность при решении задач обработки данных от разнородных датчиков и оперативного управления исполнительными устройствами в режиме реального времени. Активное использование виртуальной среды Wokwi обеспечивает безопасное и наглядное тестирование, а также гибкую пошаговую отладку. В качестве перспектив дальнейшего развития проекта планируется расширение его функционала путем добавления беспроводных модулей связи, таких как Wi-Fi и Bluetooth, а также реализация полноценного веб-интерфейса для удаленного мониторинга и визуализации данных в реальном времени.

Список источников

[1] Wallace M. *Raspberry Pi Pico and RP2040 Microcontroller*. London, Wiley, 2022, 256 p.

[2] Фролов А. В. Разработка систем управления на базе Raspberry Pi Pico. *Информационные технологии*, 2023, т. 29, № 2, с. 78–85.

[3] Ильичев В.Ю. Использование UART-интерфейса в встроенных системах. *Системный администратор*, 2021, № 3(220), с. 66–69.

[4] Brown D. *Embedded Systems with MicroPython on Raspberry Pi Pico*. New York, O'Reilly Media, 2023, 312 p.

[5] Сидоров В.П. Интерфейсы и протоколы обмена в микроконтроллерах RP2040. *Радиоэлектроника*, 2023, № 4, с. 47–54.

[6] Зайцев К.А. Применение виртуальной среды Wokwi для обучения микроконтроллерному программированию. *Информатика и образование*, 2022, № 5, с. 112–119.

[7] Горбунов А.Е. Моделирование датчиков в Wokwi при проектировании автоматизированных систем. *Прикладная информатика*, 2024, № 1(83), с. 91–99.

Researching the capabilities of the Raspberry Pi Pico microcontroller and developing a hardware and software system based on it

Drozdova Tatyana Aleksandrovna tatiana.d00@mail.ru
Gordeeva Anastasiya Eduardovna nastya.gordeeva04@mail.ru
Treshnevskaya Veronika Oktavianovna treshnevskaya@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (KB), Kaluga, Russia

The paper presents the development and simulation of a dual-module hardware-software complex based on the Raspberry Pi Pico microcontroller. The first module performs environmental parameter measurement using DHT22 and LDR sensors, while the second module controls actuators via UART communication. The architecture, data exchange mechanisms and control logic are analyzed. Simulation in Wokwi confirms system stability, data accuracy and real-time performance. The results demonstrate the potential of Raspberry Pi Pico for educational and industrial automation applications.

Keywords: *Raspberry Pi Pico, microcontroller, Wokwi, temperature sensor, UART, automation, hardware-software system*

Содержание

Секция 1. **Прогрессивные технологии, оборудование и инструментальные системы** 3

Бысов С.А. Оптимизация применения производственных мощностей в современной промышленности 5

Коршунова А.В., Зенкин Н.В. Анализ, классификация и способы подачи смазочно-охлаждающих технологических сред для повышения эффективности механической обработки 8

Юн А.В., Мусохранов М.В. Математические представления и экспериментальные исследования смачиваемости шероховатых поверхностей 12

Губанов Я.А., Малышев Е.Н. Выбор оптимального способа литья детали типа «корпус» 16

Борисов С.А., Малышев Е.Н. Прогнозирование потери стойкости обрабатывающего инструмента с использованием возможностей AnyLogic 19

Петрова Ю.С., Малышев Е.Н. Исследование влияния технологических факторов на шероховатость поверхности при торцевом фрезеровании 26

Кузьмина Е.М. Установочные элементы приспособлений: требования, типы и влияние на точность обработки 29

Суханцов А.М., Мусохранов М.В. Шероховатость поверхности и ее роль в формировании качества лакокрасочного покрытия 32

Малышев Е.Н. О планировании стойкости металлорежущих инструментов в условиях неопределенности 36

Лобуз В.В., Панюшин И.В., Рижская Д.Д. Об управлении проектом создания цеха тяжелого машиностроения в условиях неполных исходных данных по технологическому оборудованию 40

Ойдинская С.В. Некоторые технологические рекомендации по выбору инструментального материала для токарной обработки 43

Федюков Е.А., Мусохранов М.В. Влияние теплового точения на топографию поверхностей деталей машин 47

Захарова М.Э., Инагамов У.Ш. Исследование возможностей интенсификации теплообмена при применении смазочно-охлаждающей жидкости 51

Туркин Д.И., Калмыков В.В. Обеспечение качества зубчатых колес при зубофрезеровании с учетом повышения их износостойкости 55

Иванов Ю.В., Иванова Е.И. Анализ основных типов СОТС и их влияние на процессы резания 58

Иванов К.А., Иванов Ю.В. Анализ методов чистовой лезвийной обработки и способов повышения ее производительности 61

Иванов К.А., Иванов Ю.В. Твердые сплавы отечественного производства 64

Новгородова М.В., Бабинов А.Е., Калмыков В.В. Сравнительный анализ шероховатости поверхности и технологического времени при плоском и круглом шлифовании заготовок из различных материалов 71

Захарова М.Э., Гулидов Д.С. Разработка технологической оснастки для клеевой сборки узла «вал — лопастное колесо» центробежного насоса в горизонтальной плоскости 77

Дикарев Д.С., Малышев А.Н. Методы обработки материалов давлением с локальным очагом пластической деформации для изготовления корпусных деталей 81

Секция 2. **Технологии и машины сварочного производства 85**

Орлик А.Г., Орлик Г.В., Манзюк А.И. Способы повышения сопротивления гидроабразивному износу деталей машин, полученных наплавкой 87

Секция 3. **Физика конденсированного состояния и электронная техника** 91

Андреев Д.В., Цирульников И.Ю. Компенсация фоновой засветки фотодиодов 93

Перевозчикова Д.С., Кашин В.В., Андреев В.В. Влияние толщины фоторезиста и использования антирефлексных покрытий на качество проекционной фотолитографии 99

Радзышевская В.В., Кашин В.В., Андреев В.В. Влияние метода формирования подзатворного диэлектрика на качество и надежность КМОП микросхем 103

Кузнецов В.В., Полпудников С.В., Алехин А.В. Проектирование СВЧ-устройств с учетом особенностей аддитивного производства 106

Тюрин С.В., Андреев Д.В. Влияние толщины диэлектрической пленки на работу устройства выборки хранения 110

Шахаев Б.М., Кузнецов В.В., Андреев В.В., Полпудников С.В. Применение метода импульса линии передач в проектировании и анализе полупроводниковых приборов 114

Гришин Г.К., Андреев В.В. Особенности разработки правил проверки проектирования резисторов сложной формы в среде KLayout 119

Кузнецов В.В., Лыков Д.А., Козлов А.И. Оптимизация входной схемы ИМС четырехканального операционного усилителя 124

Андреев Д.И., Андреев В.В. Методы и оборудование для контроля параметров и испытаний интегральных микросхем 128

Кузин М.М., Андреев Д.В., Лыков Д.А. Исследование микросхемы источника опорного напряжения 132

Платошин В.О., Андреев В.В. Механизмы деградации диэлектрических пленок при электростатическом разряде 140

Карнюхин А.С., Кузнецов В.В., Лыков Д.А. Применение технологии NAND Flash в системах хранения данных 144

Самофалов В.Г., Кузнецов В.В., Полпудников С.В. Анализ и методы подавления помех в цепях смешанных сигналов 149

Кузнецов В.В., Лукашов Д.И. Анализ и оптимизация компонентной базы повышающего DC–DC преобразователя на основе схемотехнического моделирования в QUCS-S 155

Лыков А.Д., Андреев В.В. Микросхема быстродействующего компаратора напряжения 160

Секция 4. **Тепловые двигатели и гидромашины** 165
Иванов М.А., Савин В.Ю. Особенности выбора схемы включения питательных насосов в тепловую схему паротурбинной установки 167
Жидкова А.Д., Юрик Е.А. Исследование эффективности теплообмена с применением различных структурированных поверхностей 171
Кашанов Н.А., Жинов А.А. Исследование работы сухой вентиляторной градирни при изменении параметров охлаждающего воздуха 175
Шевелев Д.В., Жинов А.А. Совершенствование системы воздушного охлаждения электродвигателя 179
Жариков А.А., Шевелев Д.В. Использование CAE-пакета FlowVision для определения потерь в лопаточных решетках паровых турбин 183
Петрушин К.А., Ильичев В.Ю. Оценка надежности системы аварийного расхолаживания на основе анализа дерева отказов 187
Шевелев Д.В., Жинов А.А. К вопросу моделирования сопряженного теплообмена методами численного эксперимента 192
Рожкова А.А., Савин В.Ю. Тенденции и приоритеты при проектировании питательных насосов 198
Резчиков В.Р., Шевелев Д.В. Сравнительный анализ характеристик турбины центростремительного и осевого типа детандер-компрессорного агрегата 203
Краснов А.В., Шевелев Д.В. Исследование влияния различных покрытий на эрозионный износ вставок соплового аппарата 207
Миронов Ю.Н., Жинов А.А. Исследование характеристик тракта стопорно-регулирующих клапанов паровой турбины средней мощности 210
Гожин В.А., Жинов А.А. Совершенствование системы очистки воздуха транспортного газотурбинного двигателя 216

Се*кция 5.* Методы теории автоматического управления; автоматизация и управление технологическими процессами и производствами 221
Качанов А.И., Корлякова М.О. Детекция речевой активности с использованием LSTM-сетей 223
Поляков В.Н., Николаев П.В., Корлякова М.О. Применение метода Байеса для автоматизированной идентификации надводных объектов 229
Евтеева Д.М., Корнюшин Ю.П. Разработка автоматизированного места калибровщика электрорадиоизмерительных приборов 234
Чэнь Хао, Мельников Д.В. Исследование систем управления движением автомобилей на основе нечеткого ПИД-регулирования 238
Герасимова В.И., Герасимов Д.И. Об использовании оператора эволюции для описания потока данных 244
Тихонова Е.А., Финошин А.В., Тихонов А.А. Применение метода генерирующей модели для аппроксимации дискретного сигнала 248
Романов Е.С., Корлякова М.О. Применение сверточной нейронной сети для определения состояния двери самолета 253
Лысенко О.Д., Корлякова М.О. Автоматизация обработки и унификации табличных данных 259

Голенев М.К., Финошин А.В. Разработка цифрового двойника узла роспуска макулатуры в среде разработки Simulink 263
Глушков А.А., Финошин А.В. Алгоритм синтеза генерирующей модели для дискретного зашумленного сигнала 267
Сухацкий М.О., Корлякова М.О. Новый подход к дистилляции ризонинга 274
Щеглов В.А., Корлякова М.О. Детектирование двери и люка самолета при помощи YOLO 279
Кундик Е.А., Макаренков А.М. Внедрение инструментов Microsoft 365 для оптимизации управления данными в бизнес-процессах предприятия 284
Гудилин И.П., Корлякова М.О. Алгоритм классификации изделий на яркостно-частотно-временной диаграмме излучения 287
Провоторов Т.В., Финошин А.В. Фильтрация синусно-косинусных сигналов в задаче вычисления угла поворота рулевого колеса 293
Варданян Т.А., Корнюшин Ю.П. Исследование алгоритма синтеза робастных регуляторов систем управления 299
Никитин М.В., Корлякова М.О. Подход к автоматизации подготовки мультимодальных материалов для RAG-моделей 304
Семехин Д.Е., Акименко Д.А. Синтез дискретного алгоритма управления электроприводом с упругими связями 309
Шиленков И.Д., Корнюшин Ю.П. Постановка задачи синтеза следящего регулятора для стабилизации угловой скорости турбины. Проверка управляемости объекта 314
Андриенко С.В., Шамаров Е.М., Васильчук Н.Ю., Финошин А.В. Анализ тепловых снимков FLIR и построение тепловых карт с помощью Python-скрипта 320
Алябьев Арт.А., Алябьев Арс.А., Харьков В.В., Корлякова Е.Ю. Разработка прототипа автоматизированной системы разгрузки багажа с применением компьютерного зрения 324

Секция 6. **Экология и безопасность** 329
Готвальд Е.Д., Тютюнькова М.В. Агроэкологическая эффективность отходов кофейного производства 331
Никишкина А.А., Шульга С.С., Анфилов К.Л. Red-ox иониты для сорбции кислорода из аммиачных растворов 335
Ильющенко А.А., Анфилов К.Л. Комплексное использование ионитов в очистке технологических вод 339
Раздобреева П.И., Зубарева А.А., Жукова Ю.М. Комплексная оценка динамики водопользования Калужской области 342
Жукова Ю.М., Баранов М.С. Исследование эффективности применения современных сорбентов для ремедиации нефтезагрязненных вод и почв 347
Никулина С.Н., Васильев А.С. Организация охраны труда на металлургическом предприятии 355
Бахарева Е.А., Савина В.В., Жукова Ю.М. Тенденции изменения климатических факторов в Калужской области за последние 10 лет 360
Зубарева А.А., Раздобреева П.И., Жукова Ю.М. Анализ динамики объемов и структуры сброса сточных вод в Калужской области 364

Секция 7. **Современные технологии в наземных транспортно-технологических системах. Прикладные проблемы механики** 369

Васильев А.А., Плахов С.А. Тормозная система в соответствии с техническим регламентом Формулы-4 2025 371

Соловьев М.А., Бутарович Д.О. Формирование стратегии управления мощностью топливного элемента для выбора параметров энергетической установки водородного транспортного средства 375

Бруй Д.А., Бутарович Д.О. Определение потребной мощности нагревателя системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи электрического мини-погрузчика в зимних условиях 381

Бутарович Д.О., Паньшин М.В. Определение спектра нагружения электромеханической трансмиссии электробуса при знакопеременных нагрузках на маршруте 385

Грабарев А.В., Костин М.С., Алакин В.М. Формирование композитной структуры рабочей поверхности подшипников скольжения методом ХГДН 390

Шарандин П.А., Плахов С.А. Требования к системе подрессоривания болида в соответствии с техническим регламентом Формулы-4 в 2025 г. 395

Парамонов С.С. Влияние высоты центра тяжести на тормозную динамику легкового автомобиля 399

Викторов А.А., Булычев В.В. Основные требования к рулевому управлению раллийного автомобиля 402

Васильев А.А., Плахов С.А. Расчет тормозной системы гоночного автомобиля: методы, формулы и практическое применение 405

Григорьев С.Д., Плахов С.А. Алгоритм аэродинамического расчета переднего антикрыла болида Формулы-4 в программе SolidWorks (Flow Simulation) 409

Прокопов Г.С., Тетерин М.А., Голубина С.А. Активная и пассивная безопасность автомобиля: анализ эволюции и перспектив развития 417

Секция 8. **Защита информации** 421

Романов В.Н., Мазин А.В. Исследование методов мониторинга и контроля систем предотвращения утечек данных 423

Заломов К.А., Лачихина А.Б. Исследование методов мониторинга действий пользователей 427

Тронов К.А., Мазин А.В. Методы формирования датасетов на русском языке для оценки систем генерации дополненной поиском 430

Семенкин А.С., Лачихина А.Б. Разработка и исследование методов детектирования виртуальных сред для анализа защищенности программного обеспечения 434

Цайкина М.Ю., Потапов А.В. Информационная безопасность в эпоху deepfake-атак 437

Попова С.С., Потапов А.В. Вредоносное программное обеспечение на базе искусственного интеллекта: анализ возможностей и угроз 440

Секция 9. **Динамика, прочность и надежность подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования** 443

Сорокина И.И., Трифонов Д.С., Христостомов Ю.М. Определение коэффициента полезного действия цилиндрического редуктора 445

Сорокина И.И., Корешников А.И., Никульшин М.С. Модернизация вибрационного устройства очистки конвейерной ленты 449
Сорокина И.И., Ловчев О.В. Повышение надежности конвейера на основе резервирования приводной станции 453
Леонтьев М.Ю., Смоловик А.Е., Михайлов Н.Ю. Некоторые итоги применения перспективной методики экспресс-оценки работоспособности цилиндрических редукторов 456

Секция 10. **Математическое моделирование и физико-математические проблемы проектирования сложных технических систем** 461
Зенкина И.А., Зенкина П.Н. Математическое моделирование давления крови в сосудах 463
Куликов А.Н., Пашутин М.М., Никулин М.А. Об одной модели нестационарной одномерной гидродинамической дисперсии в осесимметричном фильтрационном течении 466
Зобов О.В. Моделирование соотношения «качество — производительность — энергоэффективность» для квантизированных трансформерных нейронных сетей на ПЛИС 471

Секция 11. **Информационные технологии. Электронно-вычислительные системы и комплексы** 475
Титов А.Ю., Чухраев И.В. Разработка программного комплекса для проверки взаимодействия Modbus-устройств 477
Кузин Е.М., Чухраев И.В. Универсальная образовательная платформа EduCity 481
Ковров Да.А., Борсук Н.А., Задоркин С.М. Использование технологий искусственного интеллекта в диагностике и исследовании меланом кожи 485
Задоркин С.М., Борсук Н.А., Ковров Д.А. Цифровая платформа для проектирования распределительных пунктов в городских электросетях 488
Силаева Е.М., Ильичев В.Ю. Исследование эффективности численных методов интегрирования функций посредством алгоритмов, реализованных на Python и Go 492
Осипов А.А., Винокуров А.А., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Экспериментальный анализ и сравнение протоколов передачи данных для IoT-устройств: MQTT и HTTP 495
Ухова В.А., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Использование когнитивных алгоритмов при развитии речевых навыков у детей 500
Караянов Т.А., Ильичев В.Ю. Разработка и анализ функциональных характеристик интегрированной системы менеджмента небольшого бизнеса с использованием телеграм-бота 504
Винокуров А.А., Осипов А.А., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Повышение качества результатов поиска научно-технической информации в книжном фонде за счет применения технологий ИИ и метода RAG 509
Голубев М.С., Ильичев В.Ю. Разработка системы баллистического моделирования на языке C++ с применением многопоточных вычислений 513
Крысин И.А., Бровкина А.В. Разработка микросервиса мониторинга IoT-датчиков электросети 517

Евтеев А.С., Ванаков С.В., Борсук Н.А. Разработка автоматизированной платформы для научных конференций 521
Яковенко Я.В., Борсук Н.А. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов сжатия без потерь для структурированных JSON-данных в распределенных системах 525
Григорьева Д.М., Борсук Н.А. Разработка интерактивной информационной платформы для Спортивной школы Олимпийского резерва «Квант» 530
Васильев А.А., Ильичев В.Ю. Разработка специализированного программного обеспечения для автоматизации проведения соревнований по скалолазанию 534
Косова К.А., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Применение интеллектуальных алгоритмов для бронирования номеров в гостиницах 539
Васильченко А.Ю., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Анализ рыночных решений и обоснование разработки собственной системы учета мероприятий и планирования задач спортивного клуба 543
Кузьменко Д.В., Ильичев В.Ю. Разработка WPF-приложения для отслеживания рабочих процессов и сбора статистики 548
Ванаков С.В., Евтеев А.С., Борсук Н.А. Разработка веб-платформы поддержки психологического благополучия студентов 553
Макеев В.Р., Онуфриева Т.А. Многофункциональный тестовый стенд для диагностики оборудования АЗС 557
Боловинов К.М., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Выбор между проводной и беспроводной связью серверного модуля с микроконтроллером для системы коммутации высокочастотных цепей 563
Зобов О.В. Масштабируемая гибридная потоковая архитектура для энергоэффективного вывода трансформерных нейронных сетей на ПЛИС 567
Крысин И.А., Власюк Д.М. Анализ ситуации симуляторов электрических цепей в образовательных учреждениях 572
Жудова А.А., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Обзор и сравнительный анализ средств конвертации в архитектуре литературного портала 576
Зубкова А.В., Вершинин Е.В., Федоров В.О., Ильичев В.Ю. UX/UI анализ интерфейса веб-приложения для организации учебного процесса репетитора 581
Ткаченко А.В., Гулимова В.Н. Обзор ML-алгоритмов на предмет выявления возможности использования в системах прогнозирования цен на недвижимость 589
Онуфриева Т.А., Баранов В.А., Мушкамбарян Д.Т. Автоматизированная система стенда контроля функционирования тахографа 594
Онуфриева Т.А., Скрябин А.А., Баранов В.А. Разработка программного модуля для анализа данных тахографов на платформе .NET 601
Онуфриева Т.А., Мушкамбарян Д.Т., Скрябин А.А. Автоматизированная система контроля качества сборки тахографа 607
Давидович А.А. AlertaCold: система мониторинга рисков при холодовой аллергии 613

Кулаков М.А., Крысин И.А. Разработка программного модуля анализа акустических данных для определения направления движения летательных аппаратов 617
Крысин И.А., Гришко К.А. Разработка системы телемеханики на основе протокола IEC 60870-5-104 621
Олейник Ю.Д., Сидельников А.Е., Галанкин М.С., Чухраев И.В. Разработка веб-приложения для коррекции и стандартизации почтовых адресов 625
Мастыкаш Д.В., Севастьянова М.А., Чухраев И.В. Разработка BCI-системы управления курсором мыши на основе глазодвигательных артефактов электроэнцефалограммы 629
Ткаченко А.В., Ландаева Д.Н. Исследование эффективности различных систем управления базами данных для хранения и анализа данных SNMP в задачах сетевого мониторинга 633
Склярова М.С., Вершинин Е.В., Ильичев В.Ю. Обзор и анализ информационных потоков и функциональных задач, решаемых информационной системой небольшой кофейни 637
Тихонов Н.А., Савельев Т.Г., Чухраев И.В. Методика обучения нейронных сетей архитектуры Transformers для решения задач распознавания почерка 641
Ворона К.М., Сторожук В.А., Чухраев И.В. Модуль интеллектуального фаззинг-тестирования на основе обучения с подкреплением 645
Павлов И.В., Джанаев К.С., Чухраев И.В. Оптимизация подбора гиперпараметров и методов обучения YOLO V8 649
Дроздова Т.А., Гордеева А.Э., Трешневская В.О. Исследование возможностей микроконтроллера Raspberry Pi Pico и разработка аппаратно-программного комплекса на его базе 652

Научное издание

Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе

Всероссийская научно-техническая конференция

(Калуга, 11–13 ноября 2025 года)

Материалы конференции

Том 1

Художник *Э.Ш. Мурадова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 25.09.2026. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 53,95. Тираж 70 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
https://press.bmstu.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.