

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

4/2025

Редакционная коллегия журнала
«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**.

Зам. главного редактора – канд. техн. наук, доц. **И.А. Третьяков**.

Ответственный секретарь – канд. техн. наук, доц. **Е.Д. Пометун**.

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик**; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башевая**; д-р техн. наук, доц. **И.А. Бершадский**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Вытовтов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; д-р техн. наук, доц. **В.В. Карнаух**; канд. техн. наук, с.н.с. **А.А. Курушин**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов**; канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова**.

The Editorial Board of the journal
«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**.

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech., doc. **I.A. Tretiakov**.

Assistant Editor – Cand. of tech., doc. **E.D. Pometun**.

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseichik**; Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov**; Cand. of tech., doc. **T.S. Bashevaia**; Dr. of tech., doc. **I.A. Bershadskii**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., doc. **K.A. Vytovtov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., doc. **S.V. Gridin**; Cand. of tech., doc. **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., doc. **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., doc. **A.V. Zviagintseva**; Dr. of tech., doc. **S.A. Zori**; Dr. of tech., doc. **V.V. Karnaukh**; Cand. of tech., s. researcher **A.A. Kurushin**; Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen**; Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Cand. of phys. and math., doc. **V.I. Timchenko**; Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **M.N. Sheptsov**; Dr. of tech., doc. **D.V. Shevtsov**; Cand. of tech., doc. **O.G. Shelekhova**.

Адрес редакции: 283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

С 12.02.2024 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) (категория **K2** с 13.12.2024 г.) по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы,
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 230-11/2025 от 17.11.2025 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №15 от 02.12.2025 г.*

Вестник Донецкого национального университета

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 60-летию
кафедры физики неравновесных
процессов, метрологии и экологии
имени И. Л. Повха

№ 4/2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Браун В.А.* Информационно-измерительная система обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод 5
- Пометун Е.Д., Лебедев В.Н.* Модернизация конструкции и методики измерений давления микроманометром компенсационного типа МКВ-250 19
- Казаков В.В., Карповский А.Ю., Довгань А.Ю.* Математические методы вычисления углов крена и тангажа в зависимости от угла курса 25
- Алексейчик Л.В., Курушин А.А.* Моделирование фазированной антенной решетки на сдвоенных диэлектрических резонаторах с зондовым возбуждением 34
- Финошин Н.В., Попова А.Е.* Исследование неравномерности полей средней скорости в рабочей части аэродинамической трубы прямого действия 41
- Шелехова О.Г.* Оценка надежности радиотехнических устройств при повышении температуры окружающей среды 50
- Мовчан А., Савенко К.В., Рогожников Е.В., Коновальчиков А., Бокушин А.С.* Исследование электронного циркулятора для полнодуплексных систем PLC 57

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Наумов М.А., Волуева О.С.* Методы и результаты экспериментальной оценки точности ориентации наземного прибора с использованием динамически настраиваемого гироскопа 66
- Поляков С.О., Ронкин М.В., Буторова А.С., Борисов В.И.* Эффективная методика генерации синтетических данных для обучения ML-моделей диагностики аномалий в системах охлаждения цод с помощью OpenModelica 81
- Бондаренко В.И., Мартыненко А-А.М., Придворов С.В.* Применение современных веб-технологий для автоматизации учебной деятельности на примере образовательного портала 93
- Васильев П.В., Даринцев О.В., Мунасыпов Р.А.* Применение прямого метода Ляпунова для анализа устойчивости и настройки параметров ассоциативного регулятора 102

<i>Сорокин А.И., Курносое В.Г.</i> Разработка структурной схемы базы пространственных данных ограниченного пространства	113
<i>Койбаши А.А., Завадская Т.В., Койбаши А.В.</i> Программно-аппаратная реализация инфраструктуры сбора и обработки интервальных данных с использованием принципов постбинарного кодирования	122
<i>Пономарёв Д.С.</i> Алгоритмы реализации аутентификации пользователей для веб-приложений на основе библиотеки Streamlit	130
<i>Филиппин Д.А., Григорьев А.В.</i> Проектирование редактора онтологий для решения задач программирования	142
<i>Мельник А.-В.В., Ткаченко Д.Н.</i> Автоматизация принятия решений при формировании сборной видовой спортивной команды	157
<i>Полякова В.Е., Пикалёв Я.С.</i> Разработка нейросетевой модели для оценки степени диабетической ретинопатии по офтальмологическим изображениям с учётом неравномерности классов	167

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Слободин А.Д., Селиванов В.Ф., Иванов А.В., Орлов Р.Е., Хвостов А.А.</i> Прогнозирование эффектов тепловой диссипации энергии деформации в термоупругих конструкциях при термомеханической обработке	178
<i>Бершадский И.А., Гладков А.Ю., Сечина М.В.</i> Расчетная оценка искробезопасности активно-индуктивных электрических цепей взрывобезопасного электрооборудования, включая портативные приборы	192
<i>Бирюков А.Б., Полхов С.В.</i> Критерии эффективности теплогенерирующих предприятий и производственных подразделений, эксплуатирующих котельные установки	205
<i>Хисматуллин А.С., Хасанов Д.Д.</i> Разработка испытательного стенда для исследования температурного поля в системе охлаждения масляного трансформатора при разных нагрузках в цепи	210
<i>Горожанкин С.А., Киреев А.В.</i> Движение гибридного электромобиля в цикле НАМИ-2	217
<i>Начкебия Н.С., Бирюков А.Б.</i> Уточнение инженерной методики определения основных параметров шариковой теплообменной насадки регенеративной горелки	226

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Кравченко М.В., Толкачёв О.В.</i> Влияние шума от предприятий по ремонту и обслуживанию транспорта на окружающую среду и человека	233
<i>Сердюк А.И., Белецкий Я.О.</i> Особенности использования твердых коммунальных отходов при получении водорода для электротранспорта	239

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

60-летию кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии имени И. Л. Повха	244
Правила для авторов	253

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 60h
anniversary of the Department of
Physics of Nonequilibrium Processes,
Metrology and Ecology named after
I.L. Povkh

Series G: Technical sciences

№ 4/2025

CONTENTS

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Panarin V.M., Maslova A.A., Ryleeva E.M., Braun V.A.* Information and measurement system for detection, forecasting and assessment of surface water pollution 5
- Pometun E.D., Lebedev V.N.* Upgrade of the design and measurement procedure for the MCV-250 liquid-column compensation micromanometer 19
- Kazakov V.V., Karpovskii A.IU., Dovgan A.IU.* Mathematical methods for calculating the rolling and pitching angles depending on the heading angle 25
- Alekseichik L.V., Kurushin A.A.* Modeling of a phased array antenna based on dual dielectric resonators with probe excitation 34
- Finoshin N.V., Popova A.E.* Investigation of the inequality of the average speed fields in the working part of a direct-action aerodynamic pipe 41
- Shelekhova O.G.* Assessment of the reliability of radio engineering devices when the ambient temperature increases 50
- Movchan A., Savenko K.V., Rogozhnikov E.V., Konovalchikov A., Bokushin A.S.* Study of an electronic circulator for full-duplex PLC systems 57

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Naumov M.A., Volueva O.S.* Methods and results of experimental evaluation of the accuracy of orientation of a ground instrument using a dynamically adjustable gyroscope 66
- Poliakov S.O., Ronkin M.V., Butorova A.S., Borisov V.I.* An efficient approach to synthetic data generation for training ml models in anomaly diagnosis of data center cooling systems with openmodelica 81
- Bondarenko V.I., Martynenko A-A.M., Pridvorov S.V.* Application of modern web technologies for automating educational activities: a case study of an educational portal 93
- Vasilev P.V., Darintsev O.V., Munasyrov R.A.* The use of the direct Lyapunov method for stability analysis and parameter setting of the associative regulator 102

<i>Sorokin A.I., Kurnosov V.G.</i> Development of a structural scheme for a spatial database of limited space	113
<i>Koibash A.A., Zavadskaya T.V., Koibash A.V.</i> Software and hardware implementation of infrastructure for collection and processing of interval data using post-binary coding principles	122
<i>Ponomarev D.S.</i> Algorithms for implementing user authentication for web applications based on the Streamlit library	130
<i>Filipishin D.A., Grigorev A.V.</i> Designing an ontology editor for solving programming problems	142
<i>Melnik A.-V.V., Tkachenko D.N.</i> Automation of decision-making in the selecting people for specific sports team	157
<i>Poliakova V.E., Pikalev I.A.</i> Development of a neural network model for assessing the severity of diabetic retinopathy from ophthalmic images with class imbalance consideration	167

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Slobodin A.D., Selivanov V.F., Ivanov A.V., Orlov R.E., Khvostov A.A.</i> Prediction of the effects of thermal dissipation of deformation energy in thermoelastic structures during thermo-mechanical treatment	178
<i>Bershadskii I.A., Gladkov A.I.U., Sechina M.V.</i> Study of hydrodynamics of submersible heat exchange element with annular tubes for apparatus with fluidized bed	192
<i>Biriukov A.B., Polkhov S.V.</i> Efficiency criteria for heat-generating enterprises and production units operating boiler plants	205
<i>Khismatullin A.S., Khasanov D.D.</i> Development of a test bench for studying the temperature field in the cooling system of an oil transformer under various loads in the circuit	210
<i>Gorozhankin S.A., Kireev A.V.</i> The movement of a hybrid electric vehicle in the conditions of the NAMI-2 cycle	217
<i>Nachkebiia N.S., Biriukov A.B.</i> Refinement of the engineering methodology for determining the main parameters of the ball heat exchanger nozzle of a regenerative burner	226

TECHNOSPHERE SAFETY

<i>Kravchenko M.V., Tolkachev O.V.</i> Impact of noise from transport repair and maintenance enterprises on the environment and humans	233
<i>Serdiuk A.I., Beletskii I.A.O.</i> Using municipal solid waste to produce hydrogen for electric vehicles	239

INFORMATION SECTION

60th anniversary of the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh	244
Instructions for authors	253

Э Л Е К Т Р О Н И К А , Ф О Т О Н И К А , П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е И С В Я З Ъ

EDN PWBTTT
УДК 504.4.054

DOI 10.5281/zenodo.18229624

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

© 2025 *Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Браун В.А.*

Ни одна система мониторинга не может обеспечить измерение всех необходимых параметров на всех участках с той частотой, которая была бы желательна. Поэтому для оценки влияния диффузного загрязнения, особенно на большие водоёмы, рекомендуется использовать в таких системах математическое моделирование и геоинформационные технологии. Для принятия обоснованных управленческих решений необходимы данные мониторинга в достаточном временном и пространственном разрешении для выявления изменений условий водных объектов посредством улучшенных (проверенных) методов обнаружения событий, связанных с загрязнением. В статье рассмотрена информационно-измерительная система обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод, в которой применяются новые телеметрические комплексы для измерений исследуемых параметров качества воды при их пространственно-временных изменениях, а также подходы с принятием управленческих решений.

Ключевые слова: прогнозирование экологических ситуаций, поверхностные воды, снижение сбросов ЗВ, автоматизированная система контроля, модуль сбора, концентрации ЗВ, интегральная оценка, математические модели, матрица прогнозных значений, передача данных.

Введение. В последние десятилетия произошёл стремительный прогресс в области методов прогнозирования, которые могут быть с успехом использованы для экологического моделирования. В целях обеспечения экологической безопасности водных ресурсов предлагается новый подход к мониторингу с помощью информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод.

Подобная информационная система, функционирующая на основе потоковых данных, будет обеспечивать постоянное обновление информации, что позволит получать более точные и достоверные сведения о состоянии водных ресурсов. Особое внимание следует уделить разработке и внедрению математической модели, предназначенной для прогнозирования уровня загрязнения поверхностных сточных вод в жилых зонах, расположенных вблизи промышленных объектов [1].

Прогнозирование экологических ситуаций основывается на высоком уровне профессионализма и доступа к накопленным актуальным данным. В качестве источников информации используются статистические данные, космические снимки, информационные материалы с научных станций и полигонов, а также данные о состоянии окружающей среды и природных ресурсов из различных государственных органов и служб.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20012, <https://rscf.ru/project/25-24-20012/>, а также по соглашению о предоставлении из бюджета Тульской области гранта в форме субсидий №30-2025-000524 от 03.04.2025.

Однако прогнозирование экологических ситуаций, как и любое другое, сталкивается с проблемами и рядом ограничений. Наиболее значимыми из них являются информационные проблемы, решение которых напрямую влияет на точность и достоверность прогнозов.

Прогнозирование экологических ситуаций без учета значимости каждого фактора может привести к ошибкам. Точными оказываются прогнозы, основанные на ключевых, ведущих факторах.

В настоящее время безотходные технологии пока невозможны, поэтому важно и необходимо разработать способы и средства для поддержания экологического баланса. Один из таких методов – расчет необходимого снижения сбросов загрязняющих веществ, чтобы предотвратить ухудшение экологической ситуации. Он включает создание матриц текущих и прогнозных концентраций загрязняющих веществ, а также оценку их изменения относительно текущих значений.

При реализации системы в рамках конкретных промышленных регионов необходимо определить перечень анализируемых загрязняющих веществ, исходя из специфики загрязнений, характерных для данных территорий. В результате матричной обработки информационного потока система будет предоставлять актуальную информацию для принятия экологически значимых управленческих решений, направленных на улучшение качества поверхностных сточных вод.

Тенденции в развитии систем мониторинга, связанных с прогнозированием и оценкой состояния поверхностных вод в контексте их загрязнения. Моделирование процессов загрязнения, включая прогнозирование экологической ситуации в промышленно развитых регионах, позволяет избежать некоторых неточностей и помогает решать важные задачи, такие как выбор оптимального расположения постов мониторинга. Это окажет непосредственное влияние на процесс передачи и анализа собранных данных. На центральном сервере будет проводиться анализ информации о состоянии сточных вод, в результате чего будут выявлены паттерны (повторяемые конструкции и закономерности в потоке событий загрязнения), тенденции и возможные аномалии в параметрах качества исследуемых водных объектов (рис. 1).

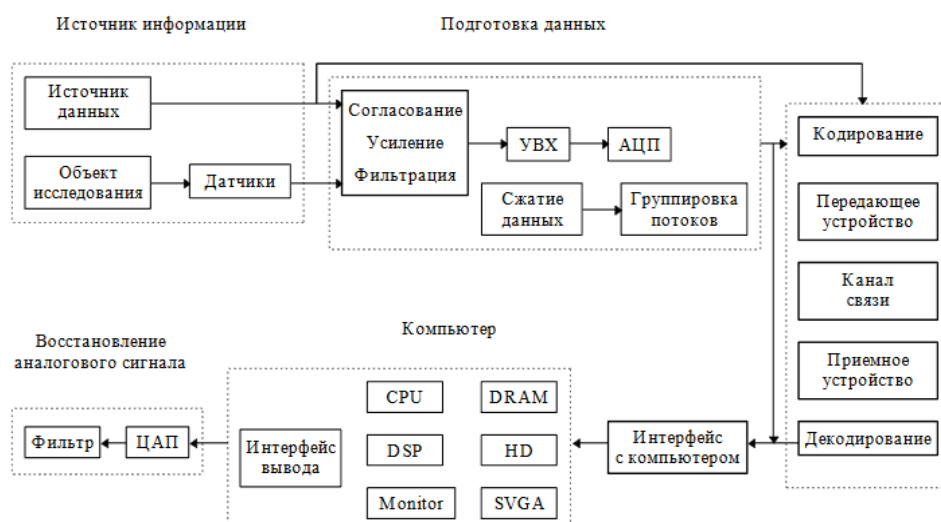


Рис. 1. Функциональная схема рентабельной работы мониторинга по прогнозированию, контролю, и оценке событий, связанных с загрязнением поверхностных вод

В последние годы отмечается рост случаев загрязнения водных объектов, что обусловлено как антропогенной деятельностью, так и совершенствованием методов мониторинга и контроля со стороны государственных и муниципальных органов. Проведение регулярного мониторинга водных ресурсов представляет собой сложную задачу, требующую охвата участков рек, куда поступают сточные воды, в том числе от очистных сооружений. Следует подчеркнуть, что значительный ущерб водным экосистемам наносят не только крупные промышленные предприятия, но и организации жилищно-коммунального хозяйства, ответственные за очистку и утилизацию сточных вод.

В 2021 году на территории РФ зафиксировано 582 случая экстремально высокого загрязнения пресных вод на 137 водных объектах. Кроме того, зарегистрировано 1684 случая высокого загрязнения на 281 водном объекте. Превышения ПДК по 29 загрязнителям и шести показателям качества воды (рН, АСПАВ, БПК₅, растворённый кислород, ХПК, запах) выросли на 10 % по сравнению с 2020 годом. Суммарное количество случаев высокого (ВЗ) и экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) достигло максимального значения за период 2019–2021 годов. Отклонение годового значения показателя от среднего значения за три года составило 14 %.

В 2023 году в России зафиксировали рост случаев экстремально высокого загрязнения рек, озёр и других пресных водоёмов. По сравнению с предыдущим годом, показатель увеличился на 62%. Больше всего случаев с высоким и экстремально высоким уровнем загрязнения зафиксировали в Свердловской области. Это 29,2% от всех инцидентов. Из 2762 случаев загрязнения в 2023 году 1879 были высокими, а 833 — экстремально высокими. Количество последних, наиболее опасных случаев, выросло на 62% по сравнению с 2022 годом [2].

Стоит обратить внимание, что в период весеннего паводка поверхностные сточные воды, не подвергшиеся своевременной очистке, поступают в речные системы и распространяются по их водосборным бассейнам. В этих водах могут присутствовать различные химические соединения. В первой половине 2023 года, аналогично показателям предыдущего года, март характеризовался максимальным уровнем загрязнения водных объектов. В течение указанного месяца было зафиксировано 285 случаев загрязнения пресных водоемов.

Как общеизвестно, для большинства веществ, являющихся источниками загрязнения водных объектов, характерна значительная сезонная вариабельность концентраций. Данная особенность обусловлена влиянием множества факторов, включая аварийные сбросы стоков и непредвиденные эмиссии загрязняющих агентов с наземных поверхностей. В последующий 2024 год сохранялась аналогичная тенденция годового распределения техногенных случаев загрязнения поверхностных вод.

При оценке долгосрочных тенденций рекомендуется использовать непараметрические методы статистического анализа. Эти методы позволяют исследовать как естественные пространственные и временные вариации химического состава воды, так и изменения антропогенного происхождения. Непараметрические методы обладают рядом преимуществ по сравнению с параметрическими подходами. Они не зависят от разброса концентраций загрязняющих веществ в водной среде, не подвержены искажениям при отсутствии или нестандартности данных, а также характеризуются простотой расчета статистических показателей. Эффективность этих методов сохраняется даже при ограниченном объеме выборки. Так, для оценки относительных долгосрочных изменений может быть применен непараметрический тест Кенделла, предназначенный для анализа монотонных трендов [3].

Структура информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод. Информационно-измерительная система позволяет автономному модулю дистанционного наблюдения за поверхностными водами перемещаться по заранее заданному маршруту без участия человека, с остановками для отбора проб воды в заданных точках. При остановке в определенных точках, проводятся измерения параметров воды и концентрации загрязняющих веществ с помощью специальных датчиков, встроенных в модуль [4, 5].

Структура информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод представлена на рисунке 2.

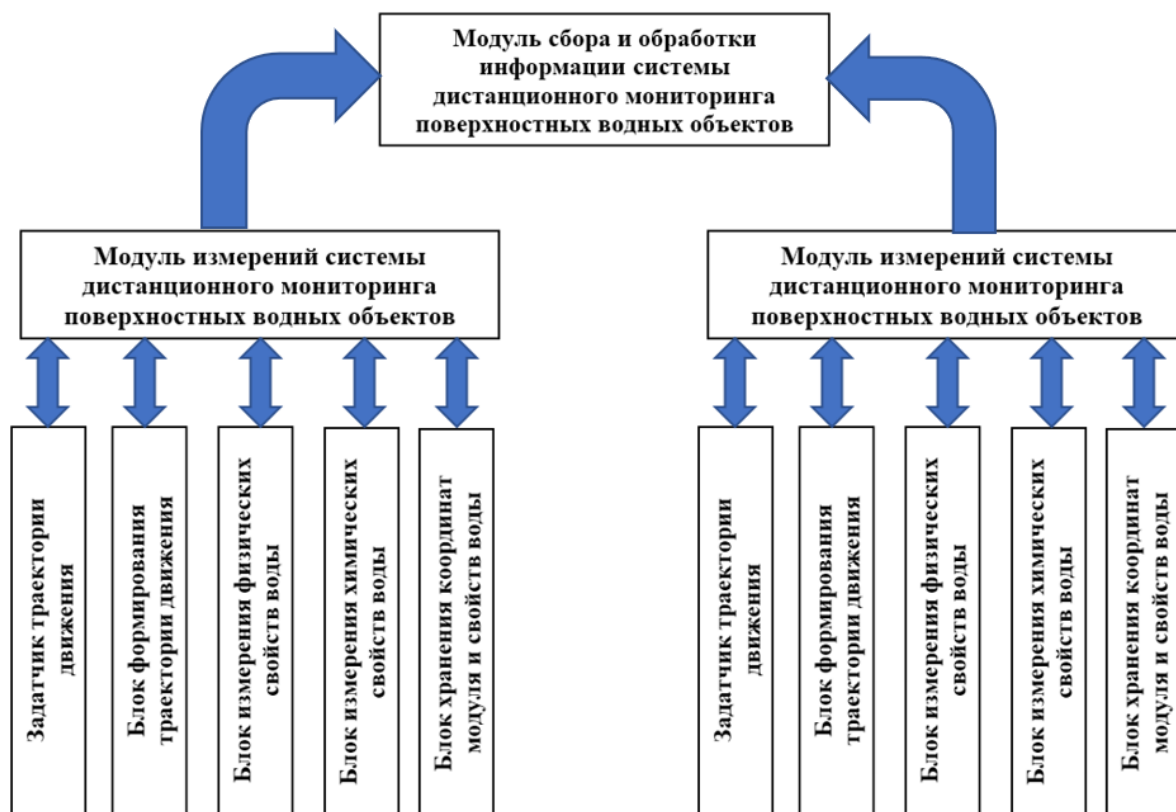


Рис. 2. Структура информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод

Устройство для дистанционного мониторинга водных объектов, что предстает в виде модуля, собирает и обрабатывает данные, выполняя несколько ключевых функций:

- планирует маршрут измерений на поверхности воды, включая зоны сточных выбросов предприятий;
- отображает маршрут измерений на электронной карте водного объекта;
- быстрая корректировка маршрута;
- устанавливает параметры для измерения уровня загрязнения воды;
- прием и обработка данных о загрязнении воды.

Это устройство контролирует движение по водной поверхности, следуя заданному маршруту и собирая информацию от системы мониторинга. Задатчик управляет движением модуля по водной поверхности, поддерживая заданную траекторию.

Блок формирования траектории движения контролирует движение модуля измерений, следуя заданной траектории на поверхности воды. Он использует данные от задатчика траектории. Блок измерения физических свойств воды измеряет параметры, которые характеризуют физические свойства воды. Он определяет параметры, такие как мутность, уровень pH и электропроводность проб воды, взятых во время мониторинга. Эти данные помогают оценить текущее состояние водной среды. Блок измерения химических свойств воды анализирует химический состав воды. Он отслеживает уровень загрязнения поверхности воды химическими веществами. Это позволяет выявлять потенциальные угрозы для экосистемы и предпринимать необходимые меры. Блок хранения координат и свойств воды сохраняет параметры, полученные в процессе мониторинга. Он хранит координаты местоположения модуля измерений и результаты измерений физических и химических свойств воды. Эти данные передаются на модуль сбора и обработки информации, где их анализируют и интерпретируют [4, 5].

Примером концептуальной модели является запатентованное (Патент на изобретение 2778289) автоматизированное устройство контроля загрязнения в виде малого беспилотного судна (МБС), схема которого представлена на рисунке 3 [6].

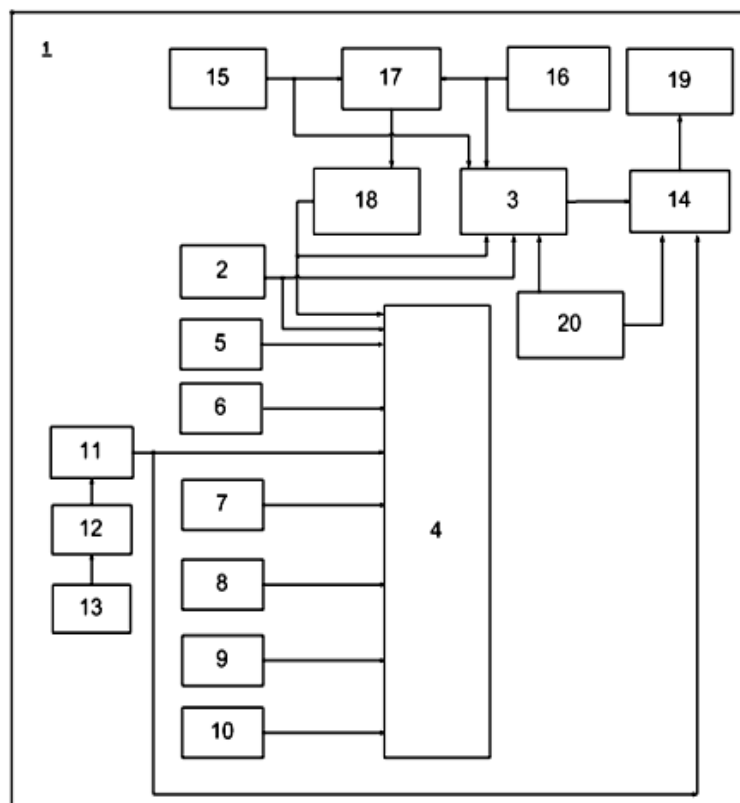


Рис. 3. Структурная схема устройства:

- 1 – небольшое судно; 2 – антенна для приёма сигналов GSM; 3 – блок хранения данных; 4 – бортовой компьютер (ЭВМ); 5 – камерное устройство (для технического зрения); 6 – лазерный дальномер; 7 – параметрический профилограф; 8 – гироскоп; 9 – микроэлектромеханический акселерометр; 10 – магнитный компас; 11 – устройство для определения расстояния и остановки судна; 12 – блок сравнения расстояния до препятствия; 13 – датчик расстояния до препятствия; 14 – устройство для интернет-передачи данных через мобильную сеть GSM; 15 – 1-ый датчик сравнения; 16 – 2-ой датчик сравнения; 17 – устройство для сравнения данных; 18 – устройство для коррекции движения; 19 – антенна; 20 – таймер

Автоматизированное устройство дистанционного мониторинга поверхностных водных объектов на основе малого беспилотного судна работает следующим образом: с борта судна, движущегося по заданному маршруту и ориентирующегося по антенне GSM-приемника, магнитному компасу, микроэлектромеханическому акселерометру и гироскопу осуществляют измерение расстояния до береговой линии (уреза воды). Спутниковая система навигации (GSM) определяет координаты антенны GSM-приемника и соответственно географическое положение судна. Одновременно ведет видеосъемку береговой линии камерой технического зрения высокого разрешения. Бортовая ЭВМ осуществляет непрерывную обработку видеоряда береговой линии с видимой подсветкой от лазерного дальномера, корректирует при этом расстояние, синхронно параметрическим профилографом определяется глубина водоема и высота донных осадков. Так же система может искать источники загрязнения воды нефтепродуктами, получая информацию с датчиков сравнения и корректируя курс блоком коррекции движения, судно движется по оси пятна загрязнения к точке, которая может являться источником загрязнения.

Информационно-измерительная система дистанционного мониторинга водных объектов разработана по модульному принципу, что обеспечивает гибкость в выборе датчиков и сенсоров в зависимости от характера загрязнения. Система включает базовый комплект оборудования и дополнительные модули, которые могут быть адаптированы для обнаружения конкретных загрязняющих веществ в различных водных объектах.

Алгоритмы управления и оценка состояния водных экосистем на основе методов идентификации загрязнений, используемые в информационно-измерительной системе. При оценке технологий, создающих отходы, важно учитывать их объем, состав и потенциальный вред для природы. Необходимо провести инвентаризацию отходов каждой технологии и определить их класс опасности. При анализе воздействия на водоемы следует обращать внимание на сточные воды и содержащиеся в них загрязнения. Для оценки сбросов в водоемы нужно рассмотреть следующие факторы:

- источники и объемы выбросов загрязняющих веществ;
- перечень загрязняющих компонентов в сбросах;
- количество сбросов до очистки на тонну продукции;
- методы очистки и утилизации отходов;
- количество сбросов после очистки на тонну продукции.

Методы обнаружения событий, связанных с загрязнением, можно условно разделить на статистические, методы, основанные на гидравлических моделях и на машинном обучении.

При статистическом подходе обнаружение событий, связанных с загрязнением, часто основывается на распределении данных о параметрах качества воды. Однако из-за нелинейных и нестационарных характеристик качества воды статистические методы обычно не подходят для обнаружения небольших аномальных изменений в водотоках [7].

Подходы, основанные на гидравлических моделях, выявляют случаи загрязнения, сравнивая наблюдаемые данные в реальном времени с прогнозируемыми значениями с помощью модели качества воды и гидравлической сети. Гидравлические модели требуют калибровки для правильного моделирования поведения водопроводной сети. Однако на практике сложно выполнить надлежащую калибровку, особенно для крупных водопроводных сетей, из-за сложности топологии сети и ограничений в данных.

Подход на основе машинного обучения считается альтернативой для прогнозирования параметров качества воды в реальном времени и выявления аномальных случаев загрязнения. Для этого применяются следующие входные данные:

- классификация пространственных объектов, подлежащих пересчёту;
- цифровые модели рельефа;
- геометрические характеристики объектов, включая высоту или среднюю высоту для целей кодирования.

Различные алгоритмы машинного обучения, искусственные нейронные сети были применены для обнаружения событий, связанных с загрязнением, в системах водоснабжения и водоотведения, таких как, метод опорных векторов, ансамблевые модели и долговременная кратковременная память.

Иногда несколько объектов, объединенных общим назначением или связанных технологически, оказывают негативное воздействие на окружающую среду (НВОС). Это могут быть инженерные средства для оценки качества воды и определения уровня загрязняющих веществ в водотоках при сбросе сточных вод. Например, основное производство и объект, поставляющий ему электроэнергию, пар или горячую воду, могут рассматриваться как единая система. Для каждой категории объектов разрабатываются разные виды экологической отчетности.

Особенность математической модели прогнозирования сбросов загрязняющих веществ в водные объекты заключается в ее способности районировать территории на основе текущих условий в промышленном регионе. Матрица информационного потока включает показатели текущего, ретроспективного районирования, а также на ближайшую перспективу.

Так матрица информационного потока собирает метеорологические данные и показатели загрязнения с постов наблюдения в реальном времени (t). Подобная система также прогнозирует состояние окружающей среды на момент ($t + \tau$) с помощью математического моделирования. Точность прогнозов повышается за счет адаптации моделей к конкретным условиям. Для оценки точности моделей введен коэффициент расхождения. Он определяется путем сравнения данных о концентрациях веществ, полученных с помощью компьютерного моделирования и эксперимента [8].

Поисковый прогноз анализирует динамику экологических изменений в будущем, опираясь на существующие тенденции и опыт прошлых лет. В отличие от него, нормативный прогноз формулирует стратегии и временные рамки для достижения желаемых экологических трансформаций. Его цель – создать условия, соответствующие заранее установленным нормам и потребностям.

Оценка перспектив экологической ситуации, отраженная в прогнозах всегда носит вероятностный характер. Точность и достоверность любого прогноза зависит от социально-экономических факторов, стратегических направлений развития общества и уровня технологического прогресса. При этом следует учитывать инерционность и характерное время протекания рассматриваемых процессов.

Экологически допустимый вклад (ЭДВ) приоритетных ингредиентов (ПИ) в загрязнение водных объектов – это уровень воздействия, который создается выбросами загрязняющих веществ (ЗВ) и ПИ в сточные воды. Этот уровень не нарушает экологические ограничения и учитывает влияние других неблагоприятных факторов.

Категории ПИ должны быть установлены с учетом различных режимов выбросов. Это требует обоснованных сводных расчетов загрязнения водной экосистемы, включая режимы выбросов других категорий ПИ и изменения фонового загрязнения со временем. Фоновые концентрации (мг/дм^3) определяются:

- по результатам обработки регулярных измерений приземных концентраций ЗВ, удовлетворяющих требованиям для определения фоновых концентраций;
- по результатам сводных расчетов загрязнения.

Современные технологии мониторинга состояния поверхностных водных объектов зачастую не соответствуют актуальным требованиям. Они предоставляют недостаточно точные данные, что затрудняет принятие эффективных управленческих решений в области охраны окружающей среды. В связи с этим возникает необходимость адаптации существующих систем мониторинга к условиям конкретных промышленных регионов.

При адаптации систем мониторинга следует учитывать климатические особенности региона, рельеф местности с расположением промышленных объектов, а также объёмы и состав вредных выбросов. Интегральная оценка степени рассогласования концентраций загрязняющих веществ должна основываться на непрерывных измерениях и моделировании процессов загрязнения в реальном времени. Пусть $t = t_1$, $t = t_2$ – определенный промежуток времени, тогда площадь фигуры, ограниченной отрезком $[t_1, t_2]$, вычисляется по следующей формуле:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} [f_1(t) - f_2(t)] \cdot dt,$$

где J – вектор интегральной оценки расхождения.

Для количественной оценки показателей введём параметр $J_{\text{доп}}$, который будет обозначать максимально допустимую погрешность отклонения интегральных значений концентраций загрязняющих веществ. Условие $J \leq J_{\text{доп}}$ является критерием для выбора математической модели, наиболее подходящей для конкретной ситуации, при этом необходимо стремиться к минимизации значения ($J_{\text{доп}} \rightarrow \min$).

Вектор интегральной оценки расхождения должен определяться административными органами, которая станет основой для принятия решений в сфере охраны окружающей среды.

При проектировании информационно-измерительной дистанционного мониторинга водных объектов необходимо рассматривать минимизацию затрат на автоматизацию в качестве одного из ключевых критериев оптимизации:

$$Z_{np} = \sum_{i=1}^n [C_{\text{экс}i} + E_n K_i]. \quad (1)$$

Согласно формуле (1), K – это вложение средств в разработку и внедрение автоматизированной системы для отслеживания и контроля за состоянием окружающей среды; $C_{\text{экс}}$ – годовые эксплуатационные расходы; E_n – нормативный коэффициент; n – количество загрязняющих веществ.

Применение в информационно-измерительной системе методов расчета и подходов для обеспечения сокращения объемов выбросов и сбросов ЗВ в поверхностные водные стоки. При планировании и реализации экологического мониторинга водного объекта специалист обязан определить величину шага, принимая во внимание следующие факторы:

1. Тип загрязняющего вещества и временной интервал, необходимый для выполнения экспресс-анализа (Δt);
2. Режим эксплуатации катера, обеспечивающий возможность непрерывного мониторинга концентрации загрязняющих веществ, изменение которой можно наглядно представить в расчете по следующей формуле:

$$\Delta d_{\min} = \Delta t_{\text{анализа}} \cdot V_{\text{катера}}.$$

3. Требования к точности определения зоны распространения загрязнения.
4. Объем доступных ресурсов для проведения соответствующих измерений [9].

В ходе исследования были изучены методы моделирования распространения загрязнений в водотоках для интеллектуальных информационных систем (ИИС) мониторинга. На основе этого был разработан новый метод, использующий систему экспоненциальных аппроксимирующих функций. В качестве примера применения ИИС мы представляем упрощенную схему водотока, что помогает оценить распределение загрязняющих веществ при сбросе сточных вод.

Для расчетов в водотоках используются следующие актуальные методики [10]:

- детальный метод Караушева (ГГИ) для расчета основного разбавления;
- метод Фролова-Родзиллера (ВОДГЕО) для расчета основного разбавления;
- экспресс-метод ГГИ для расчета основного разбавления;
- метод УралНИИРХ для расчета начального разбавления.

Расчеты должны осуществляться с учетом лимитирующего показателя вредности загрязняющих веществ. Начальное разбавление следует определять методом Николая Николаевича Лапшева [11]. Данный метод применяется для точечных и диффузных выпусков при скорости потока из выпуска более 2 м/с или при отношении скоростей речного и сточного потоков, где U_p и U_{cm} обозначают скорости речного и сточного водных потоков соответственно.

При этом величина U_{cm} определяется по соответствующей формуле:

$$U_{cm} = \frac{4 \cdot q_p}{\pi \cdot D_B \cdot N},$$

где q_p – общий расход сточных вод, м³/с; D_B – диаметр выпуска, м; N – количество выпусков.

Скорость сточных вод (на примере начального разбавления выпуска сточных вод АО «Тулагорводоканал») вычисляется ниже по формуле:

$$U_{cm} = \frac{4 \cdot 2,125}{3,14 \cdot 1,1 \cdot 2} = 1,23 \text{ м/с}.$$

Мы исследовали как устоявшиеся модели, так и новые альтернативы, причем в последних использовались подходы машинного обучения. Эти модели могут фиксировать особенности данных временных рядов качества воды на основе тестов с использованием базы данных, составленной на основе показаний датчика, установленного в одном месте. Однако эти модели не учитывают пространственные взаимосвязи между данными датчиков, расположенных в разных местах, что может привести к увеличению числа ложных срабатываний. Это особенно заметно, когда на станции мониторинга во время нормальной работы происходят значительные гидравлические колебания.

Для устранения этой проблемы был разработан инструмент "Пересчёт цифровой модели местности". Данный инструмент позволяет изменять масштаб цифровой модели местности, повышая её детализацию. Это способствует повышению удобства и точности моделирования. Так, при наличии модели с ячейками размером 10 метров, возможно её масштабирование до ячеек, уменьшив до 1 метра [12].

В качестве инструмента предлагается использовать метод расчета необходимого сокращения объемов выбросов и сбросов загрязняющих веществ для предотвращения ухудшения экологической обстановки в жилых зонах, прилегающих к предприятию. Данный метод предполагает создание матрицы текущих концентраций загрязняющих веществ в сточных водах, формирование матрицы прогнозных значений, оценку изменений прогнозных показателей относительно текущих данных, а также сравнение прогнозных значений с ПДК [13].

Матрица прогнозных значений схематично представлена в форме ниже:

$$[p_{nk}(t+\tau)] = \begin{bmatrix} pC_{np.1}^1(t+\tau) & pC_{np.2}^1(t+\tau) & pC_{np.3}^1(t+\tau) \dots & pC_{np.k}^1(t+\tau) \\ pC_{np.1}^2(t+\tau) & pC_{np.2}^2(t+\tau) & pC_{np.3}^2(t+\tau) \dots & pC_{np.k}^2(t+\tau) \\ pC_{np.1}^3(t+\tau) & pC_{np.2}^3(t+\tau) & pC_{np.3}^3(t+\tau) \dots & pC_{np.k}^3(t+\tau) \\ pC_{np.1}^i(t+\tau) & pC_{np.2}^i(t+\tau) & pC_{np.3}^i(t+\tau) \dots & pC_{np.k}^i(t+\tau) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $p_{nk}(t+\tau)$ значение n-ого показателя, участвующего в информационном потоке в k-ой позиции исследуемого промышленного региона в момент времени $t+\tau$;

$C_{np.k}^i$ – концентрация i-ого загрязняющего вещества в атмосферном воздухе в позиции k исследуемого промышленного региона, полученная в результате прогнозирования процессов загрязнения атмосферы на момент времени $t+\tau$.

В соответствии с матричным уравнением (2), если $\Delta pC_k^i(t) > 0$, значит прогнозные значения не превышают ПДК, мероприятий не проводим. Если хотя бы одно значение $\Delta pC_k^i(t) < 0$, то вводится режим снижения выбросов предприятиями региона именно поэтому параметру, если несколько $\Delta pC_k^i(t) < 0$, то вводится режим снижения выбросов предприятиями региона именно по этим параметрам.

Программное обеспечение информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод. Экологические данные на сервере ИИС собираются через стационарные посты мониторинга, подключенные различными каналами связи. Дополнительно в системе установлено программное обеспечение (ПО), которое можно установить на компьютеры. Оно позволяет операторам оперативно получать актуальную информацию об экологической ситуации в реальном времени.

Назначение ПО автономной системы дистанционного мониторинга поверхностных водных объектов заключается в обеспечении оперативного контроля в реальном времени. Оно предназначено для отображения траектории движения модуля измерений и параметров загрязняющих веществ на поверхности водного объекта, обеспечения контроля за выполнением задач и мониторинга показателей датчиков, интегрированных в автономную систему.

Структура программного обеспечения представляет собой основу для функционирования автоматизированной системы непрерывного контроля и мониторинга выбросов и сбросов загрязняющих веществ в атмосферу и водные объекты предприятия. В состав программного обеспечения входят следующие модули:

1. Программный модуль автономного экологического метеорологического комплекса.
2. Программный модуль для расчета и визуализации распространения загрязнений при аварийных выбросах опасных химических веществ.

3. Программный модуль сбора и предварительной обработки данных автоматизированной системы непрерывного контроля сбросов загрязняющих веществ в водные объекты.
4. Программный модуль автоматизированного контроля температуры и концентрации газов в отводящей трубе для дистанционного мониторинга состояния рекультивированных свалок коммунальных отходов.

Программное обеспечение, разработанное для информационно-измерительной системы, которая занимается мониторингом, прогнозированием и анализом состояния поверхностных вод предназначено для эксплуатации на рабочем месте. Оно осуществляет сбор и передачу данных посредством специального модуля приема-передачи информации через каналы сотовой связи (рис. 4).



Рис. 4. Программное обеспечение информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод (общий вид)

Для решения задачи мониторинга загрязнения водных объектов и атмосферы наиболее эффективно применение сети GSM для организации каналов передачи данных; позволяет создать единую автоматизированную систему мониторинга с обоснованием загруженности каналов передачи информации, что обеспечит надежность работы системы в целом. Такое решение обеспечивает сбор и хранение информации о местоположении и состоянии потенциально опасных объектов с помощью GPS/ГЛОНАСС и передачу ее с заданной периодичностью. Концентрацию вещества можно рассчитать с помощью программы ПОТОК СБРОС 2.1. Программа учитывает сбросы сточных вод предприятий в водные объекты, соблюдая нормативные требования к самим сточным водам и качеству воды в контрольных точках водопользования [14-15].

Все собранные данные сохраняются в блоке памяти и обрабатываются бортовым вычислительным комплексом. После этого они передаются через модуль GSM-связи в базы данных или в информационные центры для использования в целях оперативного управления или для формирования соответствующих графических материалов.

Устройство функционирует в автоматическом режиме в соответствии с предварительно загруженным маршрутным заданием. Редактирование и загрузка заданий выполняются посредством программного обеспечения (ПО) системы. Загрузка осуществляется через спутниковый канал связи «Iridium». Программное обеспечение управления устройством обеспечивает мониторинг выполнения задания, контроль функционирования датчиков и отображение местоположения на экране в виде мнемосхемы и карты. В процессе выполнения возможно аннулирование текущего задания или загрузка нового.

Датчики, предназначенные для измерения параметров выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, установлены на стационарном источнике выбросов. Они подключены к элементам электротехнического шкафа подсистем посредством проводных линий связи. Данные измерений передаются на верхний уровень автоматизированной системы мониторинга. Подсистема верхнего уровня мониторинга находится в диспетчерском центре экологического контроля предприятия. Она обеспечивает непрерывный контроль за выбросами загрязняющих веществ, передачу информации в Государственный фонд данных государственного экологического мониторинга, прогнозирование потенциально неблагоприятных экологических ситуаций и информационную поддержку для принятия управленческих решений по предотвращению таких ситуаций с внедрением различных поллютантов в поверхностные воды.

При формировании перечня загрязняющих веществ необходимо учитывать положения РД 52.04.52-85. Возможность исключения из расчетов загрязняющих веществ в группе или на отдельном источнике, а также установление для них иной эффективности сокращения выбросов, чем это предусмотрено в Порядке МП-2012 или технологическими возможностями предприятия, реализуется программным обеспечением посредством введения параметра «специальная эффективность». Так, при прогнозировании неблагоприятных метеорологических условий на территории жилых зон хозяйствующие субъекты обязаны осуществлять мероприятия по снижению выбросов загрязняющих веществ в водные резервуары.

Загрязняющие вещества, характерные для конкретного объекта негативного воздействия (ОНВ), по которым на границе санитарно-защитной зоны превышены ПДК, а также те, по которым осуществляется нормирование в сфере охраны окружающей среды, определяются на основе:

- информации о технологических процессах, оборудовании, топливе, сырье и материалах, используемых для производства продукции. Эти данные позволяют провести анализ и разработать меры по снижению выбросов в атмосферу в условиях неблагоприятных метеорологических явлений (НМУ);
- сведений о непрерывности, сезонности и нестационарности работы ОНВ и его отдельных подразделений;
- характеристик источников выбросов, включая их геометрические размеры (длина, ширина, высота) и параметры газовой смеси (скорость, температура, давление, влажность, плотность, объемный расход и мощность выброса). Эти параметры влияют на условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере;
- результатов расчетов рассеивания выбросов для каждого загрязняющего вещества. Указываются уровни приземных концентраций и вклад каждого вещества в эти концентрации.

Заключение. Подытоживая, можно сказать, что прогнозирование экологических ситуаций базируется на высокой квалификации разработчиков и обширной информационной базе. В различных государственных структурах, включая министерства и комитеты, сосредоточены статистические данные, результаты космической съемки и информация, полученная с научных станций и исследовательских полигонов, а также данные о состоянии окружающей среды и природных ресурсов. Тем не менее, процесс прогнозирования сталкивается с рядом существенных барьеров. В частности, значительное влияние на точность прогнозов оказывают информационные проблемы, требующие комплексного подхода к их решению.

В связи с этим, внедрение информационно-измерительной системы обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод позволит проводить измерения концентраций загрязняющих веществ в водных объектах, а также определять координаты местоположения автономного модуля дистанционного мониторинга поверхностных водных объектов в автоматическом режиме по запрограммированной траектории по точкам отбора проб для измерения загрязнения водных объектов, обрабатывать технологические параметры с последующей передачей данных по каналу дистанционный в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Данные, полученные с помощью предлагаемой системы, позволяют проводить моделирование изменения концентрации веществ в поверхностных водах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автономная система дистанционного мониторинга поверхностных водных объектов для оперативного контроля в реальном масштабе времени / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Е. М. Рылеева, С. А. Савинкова // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 4. – С. 50-55.
2. Количество экстремальных загрязнений [Электронный ресурс]. – URL: <https://clck.ru/3KdEuT> (дата обращения: 05.04.2025).
3. Пространственно-временные изменения содержания загрязняющих веществ в поверхностных водах бассейна Северной Двины / Е. Е. Лобченко, И. П. Ничипорова, Н. Н. Оленникова [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2022. – №1. – С. 57-65.
4. Методология прогнозирования загрязнения окружающей среды в краткосрочной и долгосрочной перспективе / В. М. Панарин, А. А. Маслова, А. Н. Коваленко, В. А. Браун // Материалы 19-ой Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». – Тула, 2023. – С. 321-330.
5. Натхина, Р. И. Моделирование процессов распространения многокомпонентных промышленных выбросов / Р. И. Натхина. – М.: Наука, 2001. – 234 с.
6. Патент № 2778289 С1 Российская Федерация, МПК G01P 3/40. Устройство поиска источника сброса загрязняющих веществ при мониторинге водных объектов: № 2021124261 : заявл. 12.08.2021 : опубл. 17.08.2022 / В. М. Панарин, Е. М. Рылеева, С. С. Синельников [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – EDN TIXOVN.
7. Zilin, Li Generative adversarial networks for detecting contamination events in water distribution systems using multi-parameter, multi-site water quality monitoring / Li Zilin // Environmental Science and Ecotechnology. – 2022. – V.14. – P.100231.
8. Доклад об экологической ситуации в Тульской области за 2022 год [Электронный ресурс]. – URL: <https://ekolog.tularegion.ru/documents/> (дата обращения: 06.04.2025).
9. Микушина, В. Н. Программно-алгоритмическое обеспечение ИИС экологического контроля водных объектов с использованием геоинформационных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / Микушина Вера Николаевна; «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – Санкт-Петербург, 2010. – 144 с.
10. Караушев, А. В. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / А. В. Караушев. – Л.: Гидрометеониздат, 1981. – 175 с.
11. Оценка функционирования рассеивающего выпуска при условии отключения отдельных оголовков [Электронный ресурс]. – URL: <https://clck.ru/3MPdWs> (дата обращения: 06.04.2025).
12. Галямов, И. А. Анализ существующих методик моделирования и распространения загрязнений по суше и водной поверхности / И. А. Галямов, Г. М. Сайфутдинова, Э. М. Абзалилов // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. – Уфа: ГОУ ВПО «УГАТУ». – 2010. – С. 61-71.
13. Разработка математической модели прогноза загрязнения окружающей среды промышленно развитых регионов/ В. М. Панарин, А. А. Маслова, К. В. Гришаков [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2023. – № 1. – С.17-24.
14. Интерфейсы и каналы в GSM [Электронный ресурс]. – URL:<https://clck.ru/3MSdpt> (дата обращения: 03.04.2025).

15. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровней загрязнения воздуха и водных объектов/ Маслова А. А., Панарин В. М., Гришаков К. В. [и др.] // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 8. – С. 36-41.

Поступила в редакцию 01.08.2025 г., рекомендована к печати 25.08.2025 г.

INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR DETECTION, FORECASTING AND ASSESSMENT OF SURFACE WATER POLLUTION

Panarin V.M., Maslova A.A., Ryleeva E.M., Braun V.A.

No monitoring system can provide measurement of all necessary parameters in all areas with the frequency that would be desirable. Therefore, to assess the impact of diffuse pollution, especially on large water bodies, it is recommended to use mathematical modeling and geoinformation technologies in such systems. To make informed management decisions, monitoring data are needed in sufficient temporal and spatial resolution to identify changes in the conditions of water bodies using improved (proven) methods for detecting pollution-related events. Industrial control over the quality of treated wastewater and the effectiveness of its disinfection is carried out according to individual schedules that take into account the specifics of the enterprise's operation, purification technology and the results of water quality monitoring in the nearest water body. The article considers an information and measuring system for detecting, forecasting and assessing surface water pollution, which uses new telemetry systems for measuring the studied water quality parameters during their spatial and temporal changes, as well as approaches to making management decisions.

Keywords: forecasting environmental situations, surface water, reducing discharges of pollutants, automated control system, collection module, pollutant concentrations, integral assessment, mathematical models, matrix of predicted values, data transmission.

Панарин Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г.Тула.
E-mail: panarin_tsu@yandex.ru

Panarin Vladimir Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Labor and Environmental Protection of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

Маслова Анна Александровна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: anna_zuykova@rambler.ru

Maslova Anna Aleksandrovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Labor and Environmental Protection of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

Рылеева Евгения Михайловна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: RyleevaEM_tsu@mail.ru

Ryleeva Evgeniya Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Labor and the Environmental Protection of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

Браун Владислав Александрович

аспирант кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г.Тула.
E-mail: vladbraun16@gmail.com

Braun Vladislav Aleksandrovich

Postgraduate student at the Department of Labor and the Environmental Protection of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ МИКРОМАНОМЕТРОМ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА МКВ-250

© 2025 Пометун Е.Д., Лебедев В.Н.

Жидкостный компенсационный микроманометр МКВ-250 является образцовым средством для проверки дифференциальных манометров и других микроманометров низших классов точности. Для уменьшения погрешности визуального контроля уровня жидкости в оптической системе микроманометра, была установлена РС-камера, что позволило повысить точность и улучшить эргономику измерений. Динамические параметры в схеме измерения дифференциального давления воздушного потока: МКВ-250 – трубка Пито-Прандтля, моделировались аperiодическим звеном первого порядка. Определено время, необходимое для установления показаний с заданной точностью.

Ключевые слова: микроманометр МКВ-250, динамическая характеристика, гидравлическое сопротивление, РС-камера, трубка Пито-Прандтля.

Введение. В лабораторных и промышленных условиях стандартным методом определения средней скорости является измерение динамического давления с помощью трубок Пито-Прандтля, подключённых к дифференциальным манометрам [1, 2]. Отдельную задачу представляют собой прецизионные измерения малых разностей давлений (от 0,1 Па), необходимые для решения задач в низкоскоростной аэродинамике, системах вентиляции и при поверке измерительных приборов. В этом классе приборов образцовым по точности и стабильности является микроманометр компенсационного типа МКВ-250 [3].

Несмотря на высокую точность, эксплуатация МКВ-250 сопряжена с рядом проблем, снижающих эффективность его применения. К эргономическим и конструктивным недостаткам относятся пространственное расположение окна наблюдателя, а также оптические искажения и малый размер области визуального контроля. К субъективным источникам погрешности относятся индивидуальные особенности зрения оператора и неоднозначность визуальной оценки момента компенсации (совмещения двух конических изображений)[4].

Как показывает анализ технической документации и литературных источников, зачастую отсутствуют сведения об оценке динамических характеристиках, в частности, о времени установления показаний. Не имея этой характеристики, оператор вынужден определять интервал времени фиксации результата субъективно, основываясь на собственном опыте. Это вносит дополнительную, неконтролируемую погрешность в процесс измерения и ухудшает повторяемость результатов.

Целью работы является: выработка рекомендаций по комплексной модернизации микроманометра МКВ-250, путем применения современных методов для повышения точности визуального отсчёта показаний и исследование его динамических характеристик.

Модернизация системы визуального контроля. Точность измерения давления микроманометром МКВ-250, в основном, определяется погрешностью позиционирования микрометрического винта, цена деления лимба которого составляет 0,01 мм.

В МКВ-250 наблюдение за касанием острия штифта указателя с его отражением от поверхности воды. ведётся через смотровое окно с расстояния ~ 50 мм. Для увеличения размера изображения в смотровом окне установлена линза, а для улучшения условий наблюдения – специальные зеркала. При использовании зеркала расстояние от линзы до глаза оператора увеличивается $L \sim 100$ мм. Эффективный угловой размер для линзы с увеличением $k = 3\times$ будет равен:

$$\theta_{эфф} \approx \frac{k \cdot d}{L} = \frac{3 \cdot 0,01}{100} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \approx 62''.$$

Данное значение сравнимо с физиологическим пределом разрешения глаза. Оператор будет работать на пределе возможностей глаза, при этом необходимость сохранять фокусировку на объекте, в сочетании с неоптимальным освещением, приводит к значительному психофизиологическому напряжению. Субъективная погрешность анализа изображения становится сопоставимой с основной погрешностью, что не позволяет реализовать заданную точность прибора. Необходимо отметить, что с возрастом способность к аккомодации глаза снижается. Использование очков вносит дополнительные погрешности, ещё больше затрудняя точное определение момента совмещения конусов.

Для решения проблемы визуализации была выполнена комплексная модернизация МКВ-250. В смотровом окне микроманометра была неподвижно установлена РС-камера, имеющая разрешение 4K (3840×2160). Важной особенностью при выборе типа камеры является возможность ручной фокусировки оптической системы. Так как все расстояния фиксированы, то ручная настройка фокусного расстояния камеры позволяет получить четкое изображение в заданной точке. Таким образом однократная настройка фокуса камеры заменяет собой постоянное напряжение аккомодации глаза оператора [4].

Для повышения контрастности изображения было исследовано влияние на восприятие изображения спектра источника света. В основе выбора лежала необходимость уменьшения хроматических аберраций в оптической системе прибора и увеличения субъективного восприятия чёткости. Теоретически, монохроматический свет в области максимальной чувствительности глаза (желто-зелёный, ~ 550 - 590 нм) должен обеспечить наилучший результат. Практическое тестирование со светодиодами различного цвета (белый, синий, зелёный, желтый, красный) подтвердило, что желтый свет (~ 590 нм) обеспечивает наилучшее восприятие изображения и минимальную утомляемость оператора, что согласуется с кривой спектральной чувствительности человеческого зрения (рисунок 1).



Рис. 1. Фотография модернизированной оптической системы МКВ – 250

Оценим эффективность выполненной модернизации. Система «камера-монитор» обеспечивает линейное увеличение более 10 раз. Смещение, соответствующее цене деления лимба (0,01 мм), на экране монитора масштабируется до ~0,3 мм. При наблюдении с комфортного расстояния 0,5 м разрешающая способность глаза составляет ~0,15 мм. Следовательно, масштабированное изображение на экране монитора превышает физиологический порог, что делает его уверенно детектируемым. Аналоговое увеличение объектива камеры, дополненное возможностью цифрового зума драйвера камеры, позволяет оперативно устанавливать оптимальный коэффициент увеличения для каждой конкретной задачи, т.е. уверенно реализовать заложенное в конструкцию микроманометра точность установки микрометрического винта и минимизировать субъективную составляющую погрешности отсчёта.

Помимо преодоления физиологического барьера, установка РС-камеры делает работу оператора более комфортной и снимает жёсткие требования к остроте зрения и способности к аккомодации глаза оператора.

Исследование динамических параметров МКВ-250. Вторым источником погрешности является задержка установления показаний при использовании в качестве приемника дифференциального давления трубки Пито - Прандтля. Конструктивно МКВ-250 состоит из двух резервуаров: подвижного, большей емкости, и неподвижного (измерительного или оптического), имеющего значительно меньший объем. При изменении давления жидкость перетекает между резервуарами. В результате возникает задержка установления показаний, которая, в основном, определяется не гидравлическим сопротивлением жидкости (собственной постоянной времени МКВ-250), а диаметром трубок в приемниках давления.

В качестве математической модели этого процесса используем дифференциальное уравнение первого порядка для затухающего процесса:

$$\frac{dP}{dt} = -\left(\frac{1}{\tau}\right)P. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$P(t) = P_1 \cdot e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}, \quad (2)$$

где: τ - постоянная времени; t – время; $P(t)$ - текущее давление; P_1 – начальное давление.

В предложенной модели (2) постоянная времени определяется как:

$$\tau = R \cdot C, \quad (3)$$

где: R – гидравлическое сопротивление демпфирующего отверстия; C – гидравлическая ёмкость воздуха ($V_{возд}$) в подводящих коммуникациях, равная:

$$C = \frac{V_{возд}}{P_{атм}}, \quad (4)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление.

Для ламинарного течения в круглом сечении (формула Пуазейля) сопротивление равно:

$$R = \frac{(128 \cdot \mu \cdot l)}{\pi \cdot d^4}, \quad (5)$$

где: μ – динамическая вязкость жидкости, l – длина канала и d – диаметр канала.

Объединяя (3), (4) и (5), получаем расчётное выражение, связывающее постоянную времени с параметрами системы:

$$\tau = \frac{(128 \cdot \mu \cdot l \cdot V_{возд})}{(\pi \cdot d^4 \cdot P_{атм})}. \quad (6)$$

Уравнение (6) показывает сильную зависимость постоянной времени от диаметра приёмного отверстия d ($\tau \sim 1/d^4$). Для диапазона диаметров 0,4–0,5 мм, характерного для приёмников полного давления, и типичных параметров измерительного участка (длина соединительных трубок 3 м, диаметр 6 мм) оценка по уравнению (6) даёт величины постоянной времени от 8 до 20 секунд. Наиболее вероятному значению диаметра 0,45 мм соответствует оценка $\tau \approx 13$

Экспериментальная часть. Моделирование ступенчатого воздействия (функции Хевисайда) выполнялось путем перекрытия потока непосредственно перед трубкой Пито-Прандтля. Измерения выполнялись в следующей последовательности. Трубка Пито – Прандтля устанавливалась на срезе конфузора аэродинамической трубы АДС 200/250. Выполнялось измерение дифференциального давления. Считывались показания по лимбу микроманометра - h_1 , пропорциональное давлению P_1 . Используя модель звена первого порядка (1), вычислялось расстояние h_2 , соответствующее уменьшению давления и, соответственно, расстояния h_1 в ϵ раз. Рассчитанная высота h_2 устанавливалась на МКВ-250. Далее, операторы одновременно перекрывали поток и включали таймер. Измерялось время до начала расхождения конусов в оптической камере. Измерения повторялись несколько раз разными операторами для различных скоростей воздушного потока.

Обработка результатов измерений показала, что среднее значение постоянной времени измерительной системы (трубка Пито-Прандтля + МКВ-250) составляет $\tau = (12,5 \pm 0,5X)$ с и не зависит от абсолютной величины дифференциального давления. Данный результат находится в хорошем соответствии с теоретической оценкой по уравнению (6) для известного диаметра входного отверстия трубки ($\sim 0,5$ мм), длины подводящих коммуникаций и объёма воздуха в системе микроманометра.

Таким образом, для установления показаний с заданной относительной погрешностью ϵ необходимо время, определяемое выражением:

$$t = -\tau_{сист} \cdot \ln(\epsilon).$$

Например, для достижения точности $\epsilon = 0,5\%$ (0,005) необходимо выдержать время: $t = -12,5 \cdot \ln(0,005) \approx 12,5 \cdot 5,298 \approx 66$ секунд.

Экспериментальное определение постоянной времени проводилось в диапазоне дифференциальных давлений от 0,6 до 350 Па. Вопрос о поведении постоянной времени при давлениях, близких к верхнему пределу прибора 2500 Па требует отдельного исследования.

Вывод. Предложенная модернизация системы визуального контроля МКВ-250 с использованием РС-камеры, монитора и жёлтой подсветки, эффективно устраняет субъективную погрешность отсчёта, вызванную физиологическими ограничениями оператора, и повышает эргономику работы персонала.

На основе анализа конструкции разработана математическая модель динамики прибора как апериодического звена первого порядка. Модель связывает постоянную времени с параметрами пневматической системы на основе трубки Пито – Прандтля.

МКВ-250, несмотря на значительное время, прошедшее после начала его производства, остается одним из основных микроманометров в метрологических центрах. Учитывая полученные результаты и оснащенность современных лабораторий средствами вычислительной техники, модернизация микроманометра МКВ-250 и ряда других, например ММН-2400, может стать рекомендованной операцией, позволяющей с минимальными затратами получить значительное увеличение точности измерений и улучшить условия труда сотрудников. Компоненты, необходимые для модернизации оптической системы могут поставляться в виде собранной конструкции, не требующей специальной настройки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 8.586.1-2005. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования испытаний: введен 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 42 с.
2. Повх, И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – 2-е доп. и испр. изд. – Москва; Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1965. – 480 с.
3. Паспорт 01.00.00 ПС. Микроманометр жидкостный компенсационный с микрометрическим винтом типа МКВ-250 [Электронный ресурс]. – URL: https://energo-pribor.com/sites/default/files/2025-05/pasport_dlya_mikromanometra_mkv-250.pdf?ysclid=mjx8diwh93972186831 (дата обращения: 01.08.2025).
4. Пометун, Е. Д. Использование веб-камеры для повышения точности измерений микроманометрами МКВ-250 и ММН-2400 / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Шестидесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции, Ярославль, 22 апреля 2015 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2015. – С. 627-631. – EDN VRQUJV.

Поступила в редакцию 15.08.2025 г., рекомендована к печати 05.09.2025 г.

UPGRADE OF THE DESIGN AND MEASUREMENT PROCEDURE FOR THE MCV-250 LIQUID-COLUMN COMPENSATION MICROMANOMETER

Pometun E.D., Lebedev V.N.

The MCV-250 liquid compensating micromanometer is a reference measuring instrument. To reduce the error of visual control of the liquid level in the optical system of the micromanometer, a PC camera was installed, which allowed to increase the accuracy and improve the ergonomics of measurements. The dynamic parameters in the air flow differential pressure measurement scheme: MCV-250 – Pitot – Prandtl tube, were modeled by a first-order aperiodic link. The time required to establish readings with the specified accuracy was determined.

Keywords: MCV-250 micromanometer, dynamic characteristics, hydraulic resistance, damping, Pitot-Prandtl tube.

Пометун Екатерина Дмитриевна

кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.pometun.fnpme@mail.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Лебедев Владимир Николаевич

старший преподаватель, заведующий лабораторией кафедры физики неравновесных процессов метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: v.lebedev@donnu.ru

Lebedev Vladimir Nikolaevich

Senior Lecturer, Head of Laboratory at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ УГЛОВ КРЕНА И ТАНГАЖА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА КУРСА

© 2025 Казаков В.В., Карповский А.Ю., Довгань А.Ю.

В статье предлагаются математические методы преобразования углов крена, тангажа в зависимости от угла курса при позиционировании проходческого комбайна и его подвижных узлов в процессе обработки границ забоя.

Ключевые слова: математические методы, крен, тангаж, курс, позиционирование, проходческий комбайн.

Введение. В соответствии со стратегией научно-технологического развития [1] актуальной задачей является повышение роботизации в разных областях. В настоящее время применительно к добыче угля требуется значительное увеличение темпов проведения подготовительных горных выработок.

При ручном управлении стреловым проходческим комбайном машинист выполняет ряд функций, в том числе:

- выбирает схему обработки забоя в зависимости от состояния породного массива, принятой технологии и своих навыков;
- следит за состоянием породного массива, процессом его разрушения, размещением комбайна в выработке, пылегазовым режимом, состоянием отдельных узлов и механизмов.

При недостаточных навыках машиниста проходческого комбайна возможны следующие ситуации:

- некачественная обработка контура выработки, приводящая к переборам по сечению и к значительному объему забутовки пустот, к снижению стойкости выработки;
- значительное время отработки цикла по разрушению забоя из-за затрат времени на принятие решения по выбору схемы обработки забоя и изменению положения исполнительного органа;
- высокая трудоемкость управления, приводящая к высокой напряженности работы машиниста и его ошибкам.

Так как одним из недостатков работы комбайна является его смещение в процессе обработки забоя, несмотря на применяемые средства стабилизации, необходимо разрабатывать и применять аппаратно-программные комплексы, которые обеспечат обработку забоя по заданной программе с автоматическим более точным выдерживанием заданного профиля забоя [2].

В части охраны труда и обеспечения безопасности персонала система позиционирования позволит: обеспечить соблюдение требований федеральных правил промышленной безопасности, определить входение персонала в опасные зоны, на опасных производственных участках уменьшить число работников, уменьшить производственный травматизм, снизить аварийность техники и тем самым избежать серьезных финансовых потерь.

Применительно к проходческому комбайну это означает определение и позиционирование комбайна относительно пространства забоя, позиционирование исполнительного органа и подъёмно-поворотной секции конвейера [3]. Цель исследований – разработать математические методы с применением необходимых математических формул, сформировать методические основы для позиционирования комбайна и его подвижных узлов.

Математические методы исследования. Система координат $Oxyz$ – перемещающаяся система вместе с комбайном, в которой задается сечение выработки: z – вертикальная ось; y – горизонтальная ось, проходит вдоль середины выработки; x – горизонтальная ось. Обе оси x , y находятся в плоскости, проходящей через нижнюю часть контура выработки (опорная поверхность гусениц комбайна). Положительное направление оси y соответствует движению комбайна в выработке «вперёд». Система координат $Oxyz$ при перемещении комбайна также перемещается с учетом своей заданной траектории.

Система координат $Ouvw$ связана с математической моделью проходческого комбайна. Поскольку есть вертикальная ось поворота исполнительного органа комбайна, то эта же ось будет вертикальной осью w модели, v – горизонтальная ось, проходит вдоль комбайна по его середине, u – горизонтальная ось. Обе оси u , v находятся в плоскости, проходящей через нижние части гусениц. Положительное направление оси v соответствует движению комбайна в выработке «вперёд».

Для поворота в пространстве необходимы значения трех углов поворота, для переноса начала системы необходимы значения трех координат (x_0, y_0, z_0) . Эти параметры позволят определить фактическое положение точек исполнительного органа и подъёмно-поворотной секции конвейера в системе $Oxyz$. Значения углов (крена ω , тангажа ψ , курса θ) можно определить с помощью измерений соответствующими устройствами.

Устройства измерения горизонтальных взаимно перпендикулярных углов, угла тангажа и угла крена, закрепленные на корпусе комбайна, измеряют соответствующие значения углов положения самого комбайна в системе $Ouvw$. Если комбайн повернут относительно стенки, т.е. угол курса $\theta \neq 0$, то углы тангажа ψ (поворот вокруг оси x) и крена ω (поворот вокруг оси y) в системе $Oxyz$ не равны измеренным углам тангажа ψ_u и крена ω_u в системе $Ouvw$ (при условии, что углы θ , ψ_u , ω_u не равны нулю). Если комбайн не повернут относительно стенки, т.е. если угол курса $\theta = 0$, то углы соответственно равны $\psi = \psi_u$, $\omega = \omega_u$. Если $\theta \neq 0$, а $\psi_u = \omega_u = 0$, то $\psi = \psi_u$, $\omega = \omega_u$. Если $\theta \neq 0$ и один из углов не равен нулю, то необходимо по измеренным углам тангажа ψ_u и крена ω_u в системе $Ouvw$ вычисление углов (ψ, ω) в системе $Oxyz$.

На рисунке 1 представлены последовательные повороты на угол тангажа и на угол крена. На рисунке показана прямоугольником часть плоскости с вписанной в прямоугольник окружностью (сечение цилиндра) радиусом r в системе $Oxyz$ (в начальном положении системы $Oxyz$ и $Ouvw$ совпадают). В плоскости в системе $Oxyz$ и в $Ouvw$ на окружности на расстоянии r от O и на соответствующих осях расположены точки $A(-r, 0, 0)$, $D(0, r, 0)$, $C(r, 0, 0)$, $F(0, -r, 0)$. На рисунке 1а представлен поворот плоскости на угол тангажа ψ_u (вид на плоскость и вид снизу). В связи с поворотом плоскости на угол тангажа соответственно из точек $D(0, r, 0)$, $F(0, -r, 0)$ формируются точки D_ψ , F_ψ с другими значениями координат в системе $Oxyz$. Координаты точек D_ψ , F_ψ вычисляются при повороте вокруг оси x на угол ψ_u , причем ψ_u имеет отрицательное направление по формулам:

$$x_{\psi} = x = 0,$$

$$y_{\psi} = y \cos \psi_u + z \sin \psi_u,$$

$$z_{\psi} = -y \sin \psi_u + z \cos \psi_u.$$

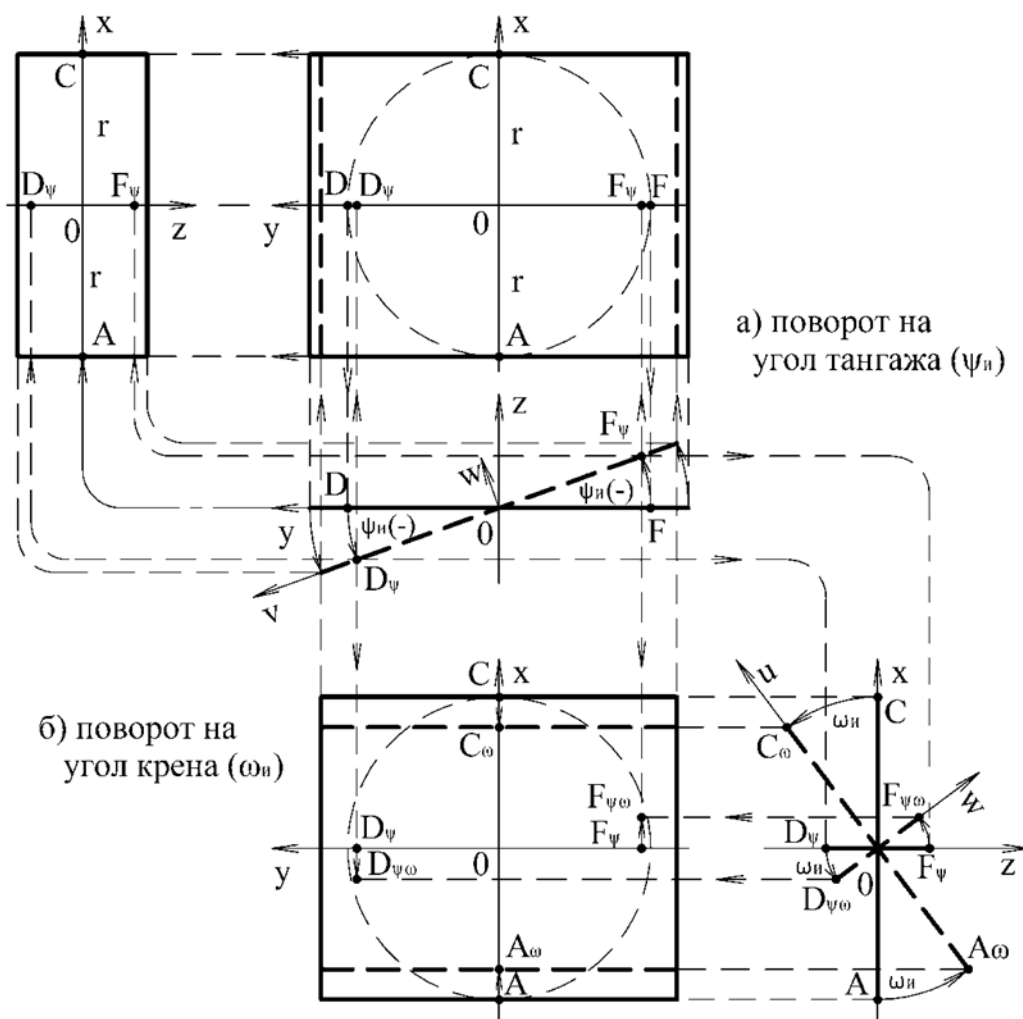


Рис. 1. Последовательные повороты на угол тангажа и на угол крена

При этом повороте точки оси x не меняют значения своих координат, в том числе и координат точек A , C . Слева на рисунке 1 показан вид (повернутой) плоскости слева.

На рисунке 1б представлен поворот этой же (повернутой на угол ψ_u) плоскости на угол крена ω_u , показан вид на плоскость и вид слева. В связи с поворотом плоскости на угол крена соответственно из точек D_{ψ} , F_{ψ} , $A(-r, 0, 0)$ и $C(r, 0, 0)$ формируются точки $D_{\psi\omega}$, $F_{\psi\omega}$, A_{ω} , C_{ω} с другими значениями координат в системе $0xyz$ (поворот вокруг оси y на угол ω_u , причем ω_u в положительном направлении) по формулам:

$$x_{\psi\omega} = x \cos \omega_u + z \sin \omega_u,$$

$$y_{\psi\omega} = y_{\psi},$$

$$z_{\psi\omega} = -x \sin \omega_u + z \cos \omega_u.$$

После обоих поворотов плоскости ADCF образована плоскость $A_{\omega}D_{\psi\omega}C_{\omega}F_{\psi\omega}$, которая в пересечении с цилиндром (окружность которого показана на рисунке) образует эллипс с большой и малой осями. На рисунке 2 показана повернутая плоскость и определение малой оси эллипса.

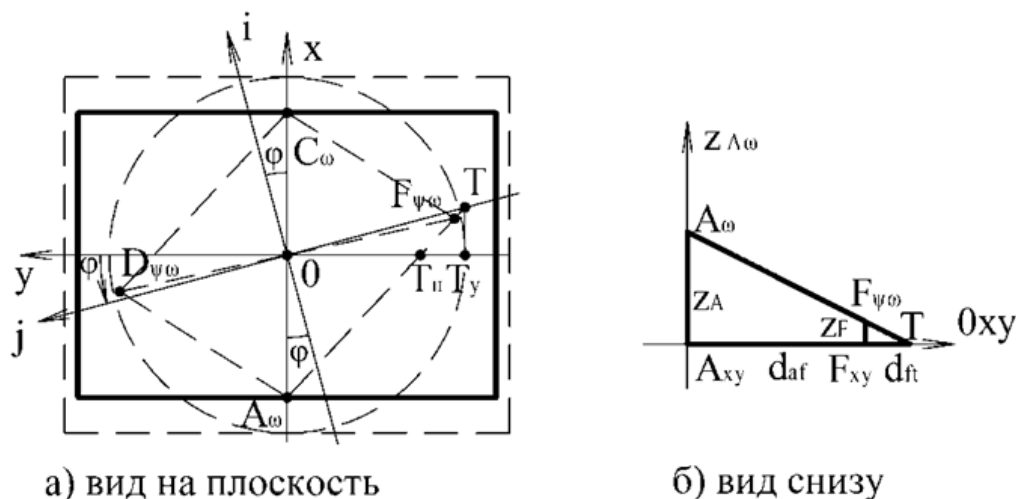


Рис. 2. Повернутая плоскость и определение малой оси эллипса

Из четырех точек (A_{ω} , $D_{\psi\omega}$, C_{ω} , $F_{\psi\omega}$) можно выбрать две, у которых аппликата больше нуля, в данном случае это A_{ω} , $F_{\psi\omega}$. Если через точки A_{ω} , $F_{\psi\omega}$ в плоскости $A_{\omega}D_{\psi\omega}C_{\omega}F_{\psi\omega}$ провести прямую линию до пересечения с малой осью (обозначенной j) или с плоскостью Oxy , то получается точка T . (В этой ситуации подразумевается, что прямая через точки A_{ω} , $F_{\psi\omega}$ не параллельна оси j). Через точки O и T в плоскости $Oxyz$ проведена прямая, являющаяся линией пересечения плоскостей ADCF и $A_{\omega}D_{\psi\omega}C_{\omega}F_{\psi\omega}$ или малой осью эллипса. Малая ось j принадлежит как одной плоскости ADCF, так и другой $A_{\omega}D_{\psi\omega}C_{\omega}F_{\psi\omega}$, включает точку O и повернута от оси y на угол φ . Большая ось, обозначенная i , перпендикулярна оси j и проведена через точку O .

Определение малой оси эллипса сводится к определению угла φ . Если прямая через точки A_{ω} , $F_{\psi\omega}$ параллельна оси j , это означает, что малая ось найдена и совпадает с осью y , угол $\varphi = 0$. А если такой ситуации нет, то сам угол можно определить по координатам точки T . Необходимо провести перпендикуляры из точек A_{ω} и $F_{\psi\omega}$ к плоскости Oxy , в пересечении с плоскостью получают соответственно точки A_{xy} и F_{xy} . На рисунке 2б показан прямоугольный треугольник при перпендикулярном виде на плоскость, образуемую точками A_{ω} , A_{xy} , T . Высоты $A_{\omega}A_{xy}$, $F_{\psi\omega}F_{xy}$ это значения аппликат $z_{A_{\omega}}$, $z_{F_{\psi\omega}}$ соответственно точек A_{ω} , $F_{\psi\omega}$. Отрезок $A_{xy}F_{xy} = d_{af}$ можно вычислить из вида на плоскость Oxy по абсциссам и ординатам точек $A_{xy}(x_{axy}, y_{axy}, 0)$ и $F_{xy}(x_{fxy}, y_{fxy}, 0)$, абсциссы и ординаты точек взяты из координат точек A_{ω} , и $F_{\psi\omega}$, по формуле:

$$d_{af} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

Введя обозначения $A_{\omega}A_{xy}=z_A$, $F_{\psi\omega}F_{xy}=z_F$, $F_{xy}T=d_{ft}$, из соотношения для подобных треугольников:

$$z_A/z_F = (d_{af} + d_{ft})/d_{ft},$$

$$d_{ft} = d_{af}z_F/(z_A - z_F).$$

Расстояния между точками A_{xy} и T в плоскости Oxy вычислено и равно $(d_{af} + d_{ft})$. Перпендикуляр из точки T на ось y дает точку T_y , а пересечение прямой, содержащей точки A_{xy} , F_{xy} , с осью y , дает точку T_{Π} .

Расстояния между точками A_{xy} и T_{Π} в плоскости Oxy можно вычислить. Известны две точки $A_{xy}(x_{axy}, y_{axy}, 0)$ и $F_{xy}(x_{fxy}, y_{fxy}, 0)$ в плоскости Oxy , уравнение прямой, проходящей через две точки $P_1(x_1, y_1)$ и $P_2(x_2, y_2)$:

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = (x - x_1)/(x_2 - x_1).$$

Сделав подстановку координат точек A_{xy} и F_{xy} , можно привести форму уравнения к виду:

$$y = kx + b,$$

где k , b конкретные значения уравнения ($b < 0$). Далее необходимо определить координату точки пересечения этой прямой с осью y , при $x=0$ из уравнения значение ординаты равно b . А это ордината точки T_{Π} , зная ее, можно вычислить расстояние между точками A_{xy} и T_{Π} по вышеприведенному уравнению прямой, проходящей через две точки. Можно вычислить гипотенузу $T_{\Pi}T$ треугольника $T_{\Pi}TT_y$, для чего из значения расстояния между точками A_{xy} и T (вычислено $d_{af} + d_{ft}$) необходимо вычесть значение расстояния $A_{xy}T_{\Pi}$ и получить гипотенузу $T_{\Pi}T (=c)$ треугольника $T_{\Pi}TT_y$. Зная значение длины гипотенузы (c) и угловой коэффициент (k), значения угла $TT_{\Pi}T_y (= \alpha)$, катетов $T_yT (=k_x)$, $T_yT_{\Pi} (=k_y)$ будут:

$$\alpha = \arctg(k),$$

$$k_x = c \operatorname{tg} \alpha,$$

$$k_y = c \operatorname{ctg} \alpha.$$

Координаты точки $T(x_T, y_T)$ с учетом ее положения на оси:

$$x_T = k_x = c \operatorname{tg} \alpha,$$

$$y_T = b - k_y = b - c \operatorname{ctg} \alpha.$$

Вычислены значения координаты точки T в системе Oxy , по ним можно определить угол φ с учетом знака:

$$\operatorname{tg} \varphi = x_T/(-y_T),$$

$$\varphi = \arctg(x_T/(-y_T)).$$

Определение большой оси эллипса сводится к определению угла ϑ . Допустим, что в пересечении плоскостей ADCF и $A_\omega D_{\psi\omega} C_\omega F_{\psi\omega}$ образован угол ϑ . Повернем плоскость Oxy вокруг оси z так, чтобы ось j стала горизонтальной на рисунке 2 (при таком повороте аппликаты точек не меняются). На рисунке 3 показан поворот плоскости и определение большой оси эллипса.

Из четырех точек (A_ω , $D_{\psi\omega}$, C_ω , $F_{\psi\omega}$) можно выбрать две, у которых аппликата больше нуля, в данном случае это A_ω , $F_{\psi\omega}$. Для определения угла ϑ следует отметить, что после проведения перпендикуляров к оси j из точек A_ω , $F_{\psi\omega}$ этот угол ϑ одинаков и с одним знаком для точек A_ω , $F_{\psi\omega}$. Из точки A_{xy} в плоскости Oxy проведен перпендикуляр d_j к оси j , зная угол φ и абсциссу A_ω можно определить d_j (рисунок 3а):

$$d_j = x_{A_\omega} \cos \varphi.$$

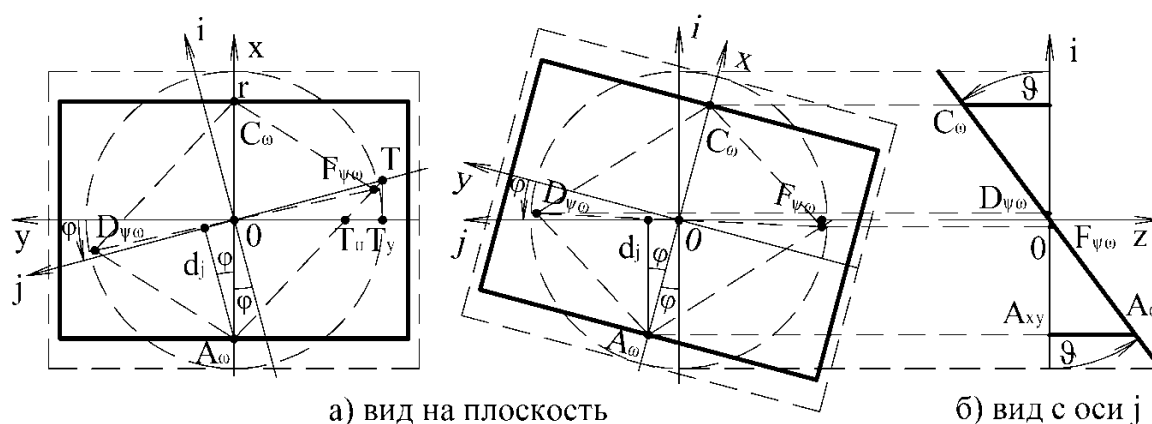


Рис. 3. Поворот плоскости и определение большой оси эллипса

Определив d_j и зная аппликату A_ω , из прямоугольного треугольника $A_{xy}OA_\omega$ (рисунок 3б) можно определить значение угла ϑ :

$$\operatorname{tg} \vartheta = z_{A_\omega} / d_j = z_{A_\omega} / (x_{A_\omega} \cos \varphi),$$

или

$$\vartheta = \operatorname{arctg}(z_{A_\omega} / (x_{A_\omega} \cos \varphi)).$$

В зависимости от угла курса θ определяются углы тангажа ψ и крена ω по построенному эллипсу на основе измеренных углов ψ_u и ω_u . Угол курса θ это угол отклонения комбайна от оси y в системе Oxy . Пусть значение угла θ задано. Если $\theta = \varphi = 0$, то углы ψ и ω равны соответственно углам ψ_u и ω_u . Если $\theta \neq 0$, а углы ψ_u и ω_u равны 0, то углы ψ и ω тоже равны 0. Для других значений ($\theta \neq 0$) можно использовать систему координат $0ijz$. Необходимо провести прямую линию в плоскости Oxy под углом θ к оси y (от точки 0). В общем случае угол θ не равен углу φ . На рисунке 4 показано определение углов тангажа и крена.

Определение угла тангажа ψ . На проведенной линии, в системе координат $0ij$, отметим точку Ж, на расстоянии r от 0 (под углом $(\theta + 90^\circ)$ к оси x). Определимся абсцисса этой точки:

$$i_{жс} = r \sin(\theta + 90^\circ - \varphi).$$

Плоскость эллипса под углом ϑ к плоскости $0xy$. Из треугольника (точки 0, с координатами $i_{жс}, z_{жс}$) на рисунке 4б для $z_{жс}$:

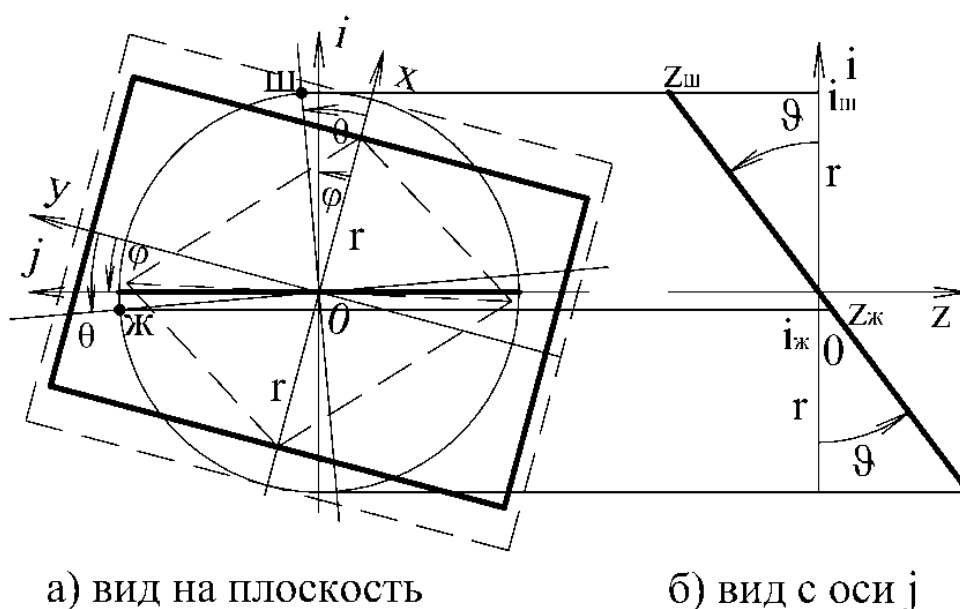
$$\operatorname{tg} \vartheta = z_{жс} / i_{жс},$$

$$z_{жс} = i_{жс} \operatorname{tg} \vartheta = r \sin(\theta + 90^\circ - \varphi) \operatorname{tg} \vartheta.$$

Откуда можно определить угол тангажа ψ :

$$\operatorname{tg} \psi = z_{жс} / r = \sin(\theta + 90^\circ - \varphi) \operatorname{tg} \vartheta,$$

$$\psi = \operatorname{arctg}(\sin(\theta + 90^\circ - \varphi) \operatorname{tg} \vartheta).$$



а) ВИД НА ПЛОСКОСТЬ

б) ВИД С ОСИ j

Рис. 4. Определение углов тангажа и крена

Определение угла крена (ω). Угол крена определяется аналогично, только проводится прямая линия в плоскости $0xy$ под углом θ к оси x , строится аналогичный отрезок с точкой Ш:

$$i_{шс} = r \sin(\theta - \varphi),$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = z_{шс} / i_{шс},$$

$$z_{шс} = i_{шс} \operatorname{tg} \vartheta = r \sin(\theta - \varphi) \operatorname{tg} \vartheta,$$

$$\operatorname{tg} \omega = z_{шс} / r = \sin(\theta - \varphi) \operatorname{tg} \vartheta,$$

$$\omega = \operatorname{arctg}(\sin(\theta - \varphi) \operatorname{tg} \vartheta).$$

Выводы. Выведены формулы, показаны методы и методика расчета углов тангажа ψ и крена ω комбайна в забое в системе $Oxyz$ при известных углах тангажа ψ_u и крена ω_u в системе $Ouvw$ при известном угле курса θ комбайна. Приведенные математические методы проиллюстрированы рисунками. Полученные формулы применимы к конкретным устройствам измерения при монтаже на комбайн. При начальной установке на комбайн устройств измерений с отклонениями от заданных углов монтажа необходимо измерить углы отклонений и учитывать их в приведенных формулах.

Приведенные методы представляют часть методов, необходимых для полного управления комбайном. Результаты являются математической основой для разработки программного обеспечения обработки забоя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145. – М: Кремль – 2024. – С. 9-12.
2. Довгань, А. Ю. Метод позиционирования проходческого комбайна в условиях ограниченного пространства / А. Ю. Довгань, В. В. Казаков, А. Ю. Карповский // О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в (горной) промышленности: Материалы круглого стола, 28 ноября 2024 года [Электронный ресурс]. – Донецк: ГБУ «НИИВЭ», 2024. – С. 40–43. – URL: <http://niive.ru/downloads/Материалы%20круглого%20стола.pdf> (дата обращения 07.08.2025).
3. Казаков В.В., Метод позиционирования исполнительного органа проходческого комбайна в условиях ограниченного пространства / В.В. Казаков, А.Ю. Довгань, А.Ю. Карповский // О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в (горной) промышленности: Материалы круглого стола, 29 мая 2025 года [Электронный ресурс]. – Донецк: ГБУ «НИИВЭ», 2025. – С. 24–26. – URL: http://niive.ru/downloads/СБОРНИК%20круг%20стол%20НИИВЭ%2029_05_25_на%20сайт.pdf (дата обращения 07.08.2025).

Поступила в редакцию 26.08.2025 г., рекомендована к печати 10.09.2025 г.

MATHEMATICAL METHODS FOR CALCULATING THE ROLING AND PITCHING ANGLES
DEPENDING ON THE HEADING ANGLE

Kazakov V.V., Karpovskii A.IU., Dovgan A.IU.

The article proposes mathematical methods for converting roll and pitch angles depending on the heading angle when positioning the tunneling machine and its movable units during the processing of the face boundaries.

Keywords: mathematical methods, lurch, pitch, course, positioning, mining machine.

Казаков Василий Васильевич

старший научный сотрудник отдела автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: oagm308@mail.ru

Kazakov Vasilii Vasilevich

Senior Researcher at the Department of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Карповский Артур Юрьевич

заведующий отделом автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: karpovsky.work@gmail.com

Karpovskii Artur IUrevich

Head of the Department of Automation of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Довгань Александр Юрьевич

кандидат технических наук, директор ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова».
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: agm_osu@mail.ru

Dovgan Aleksandr IUrevich

Candidate of Technical Sciences, Director of Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov. Russian Federation, DPR, Donetsk.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА СДВОЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ С ЗОНДОВЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

© 2025 *Алексейчик Л.В., Курушин А.А.*

Представлены результаты моделирования основных электрических характеристик фазированной линейной антенной решетки на сдвоенных диэлектрических резонаторах (ДР), установленных на металлической пластине и возбуждаемых коаксиальным зондом. Приведены характеристики излучения линейной антенной решетки на рабочем типе колебаний ДР, а также картины распределения векторных электрических и магнитных полей ближнего поля и диаграммы направленности при сканировании главного луча фазированной решетки. Отмечена возможность установки такой антенной решетки на БПЛА.

Ключевые слова: микроволновые антенны, диэлектрические резонаторы, зондовое возбуждение, методы численного моделирования, беспилотные летательные аппараты, CST SUITE.

Введение. В работе исследуются основные электрические характеристики фазированной линейной антенной решетки на сдвоенных диэлектрических резонаторах (ДР), установленных на металлической пластине при их возбуждении коаксиальным зондом, предназначенные для применения в микроволновой технике для создания антенн и антенных решеток.

Диэлектрические резонаторы выполнены из высокочастотных термостабильных материалов с повышенным значением диэлектрической проницаемости. Технической задачей предложенной конструкции антенной решетки установление зависимости угла сканирования диаграммы направленности от фазового сдвига сигнала питания зондовых возбуждателей сдвоенных ДР.

Тот факт, что диэлектрические резонаторы способны накапливать электромагнитную энергию и частично излучать ее в окружающее свободное пространство было известно давно, когда Рихмайер в 1939 году опубликовал статью [1] о модах диэлектрических сфер (шаров).

Однако, практическое применение ДР в микроволновой технике получили лишь при создании новых диэлектрических керамических материалов, обладающих уникальным сочетанием высокой диэлектрической проницаемости, повышенной термостабильности при очень малых потерях.

Первые из разработок антенных элементов и антенных решеток использовали преимущественно цилиндрические (дисковые) ДР [2-6], основные достигнутые результаты которых обобщены в книге [7].

Практические реализации антенн на диэлектрических резонаторах были предложены в работах [5, 6], при этом в [6] были даны полезные рекомендации по выбору диэлектрического материала для ДР, наиболее подходящих для антенных элементов. В качестве излучающих элементов антенн использовались цилиндрические, прямоугольные и полусферические ДР, а также составные диэлектрические структуры. Интенсивные исследования антенн и антенных решеток заложили основы для дальнейшего совершенствования антенн на диэлектрических резонаторах (ДРА) [8, 9], в том числе для применения в области мм- и суб-мм волн [8, 9].

Были проведены многочисленные исследования по выбору высокودобротных диэлектрических материалов, по анализу типов колебаний ДР в зависимости от их формы, добротности материала и частотных характеристик входного сопротивления. Были проанализированы параметры эффективности излучения ДРА, их диаграммы направленности, а также предложены различные схемы возбуждения ДР [11-12]. Были показаны преимущества ДР над широко известными малогабаритными антеннами, выполненными на пач-элементах, а также возможность использования наноантенны ДР [13].

Основная часть. На рис. 1 показан общий вид представленной в настоящей работе микроволновой фазированной антенной решетки (ФАР) из 8-ми пар ДР при размещении между ними коаксиальных зондов возбуждения симметрично относительно ДР. ДР выполнены в виде прямоугольных призм с размерами 2*2*4 мм из диэлектрического материала с относительной диэлектрической проницаемостью равной 20 и установлены на металлической пластине.

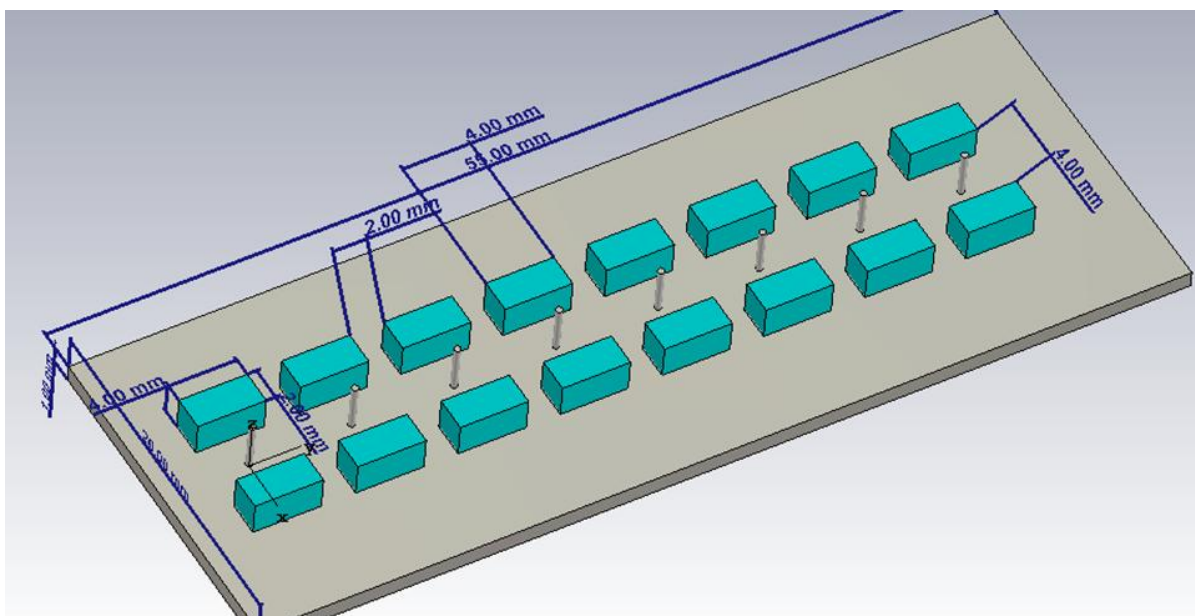


Рис. 1. Конструкция фазированной антенной решетки на сдвоенных ДР

При подаче сигналов питания на входы коаксиальных портов, имеет место возбуждение электромагнитных резонансных колебаний в ДР, зависящих от сдвига фазы сигналов питания, обеспечивающих соответствующее значение углов сканирования главного луча диаграммы направленности линейной антенной решетки. При этом на поверхности металлической пластины, выполняющей роль «электрической стенки», частично наводятся токи проводимости, усиливающие эффективность излучения, но из-за наличия ограниченных размеров металлической пластины возникает дополнительно «краевой эффект», приводящий к росту боковых лепестков, увеличивающихся при больших углах сканирования ДН антенной решетки. Аналогичные эффекты проявлялись при моделировании антенной решетки с подачей питания посредством МПЛ [14].

На рис. 2 приведены частотные характеристика коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и коэффициентов связи между портами ЛАР в широком диапазоне частот.

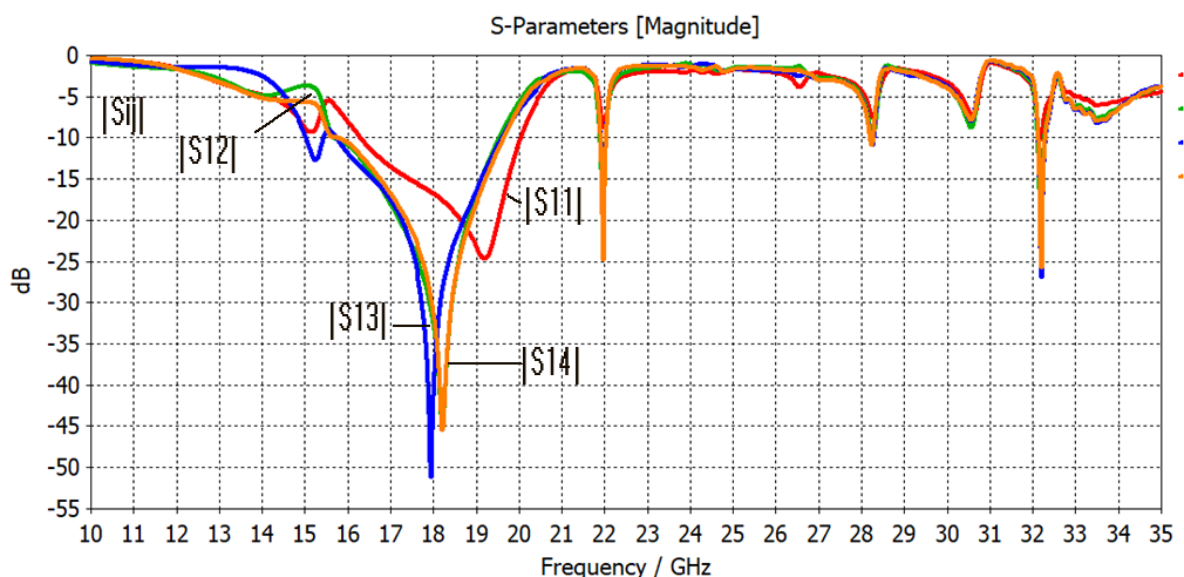


Рис. 2. АЧХ коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и коэффициентов связи $|S_{12}|$, $|S_{13}|$, $|S_{14}|$ между портами в диапазоне частот линейной антенной решетки при синфазном возбуждении

Из приведенных на рис. 2 характеристик АЧХ видно, что оптимальное согласование антенной решетки достигается в области частот 18-19 ГГц, где имеет место возбуждение ДР на низшем магнитном типе колебаний $H_{11\delta}$. При этом силовые линии магнитного поля H ориентированы вдоль наибольшего размера ДР, как показано на рис. 3 для случая синфазного возбуждения линейной антенной решетки. Следовательно, результирующие векторы магнитных моментов с двух противоположных сторон относительно системы зондовых портов в ФАР направлены в противоположные стороны относительно друг друга.

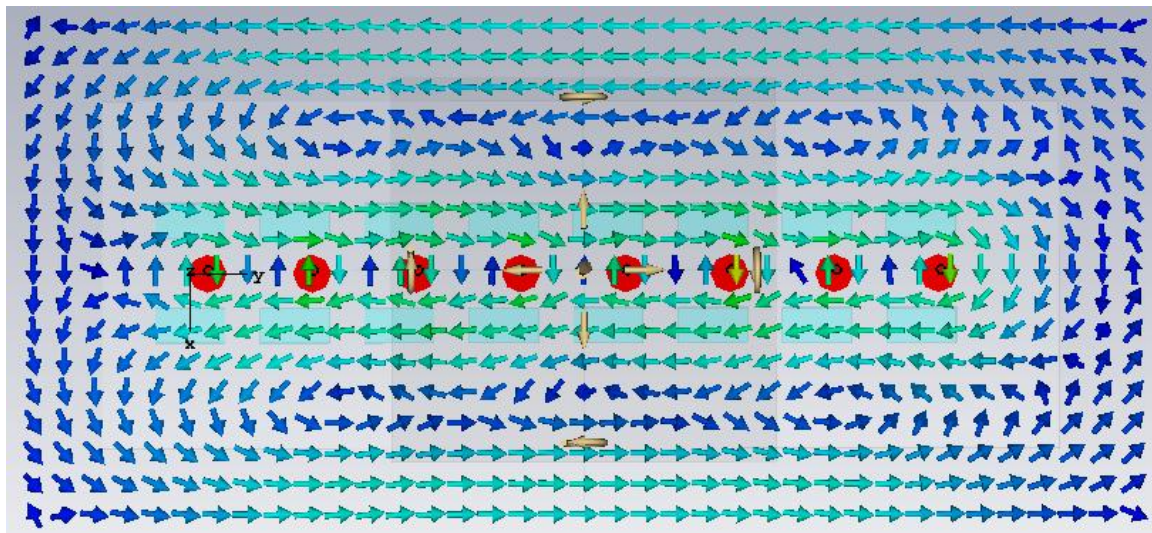


Рис. 3. Векторное поле H в горизонтальной плоскости при синфазном возбуждении ФАР

Из картины распределения электрического поля E (не приведена) видно, что силовые линии электрического поля перпендикулярны, как ожидалось, соответствующим силовым линиям магнитного поля (рис. 3) и характерны для низшего типа колебаний ДР $H_{11\delta}$.

На рис. 4 приведена диаграмма направленности ФАР при синфазном возбуждении её элементов.

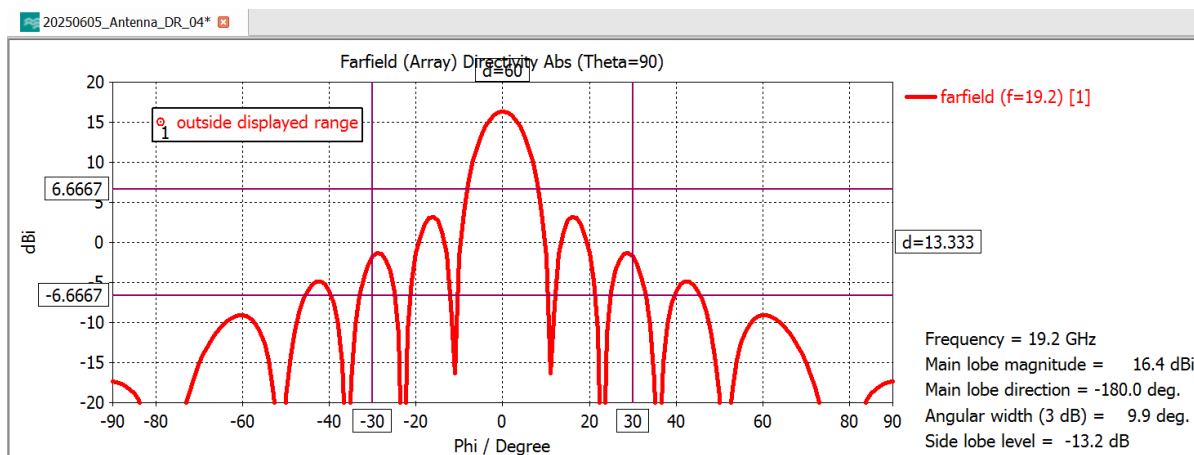


Рис. 4. Сечение ДН линейной антенной решетки из 8-ми пар ДР

Характеристика ДН на рис. 4 получена простым перемножением диаграммы направленности ДН антенны, выполненной на единственной паре ДР, на число пар ДР в ФАР (т.е. в 8 раз). Из данных рис. 4 видно, что максимальный коэффициент направленного действия (КНД) равен 16.275 дБ, т.е. КНД увеличился на 9 дБ по сравнению с КНД одной пары ДР. На рис. 5 приведена 3-D диаграмма направленности ФАР.

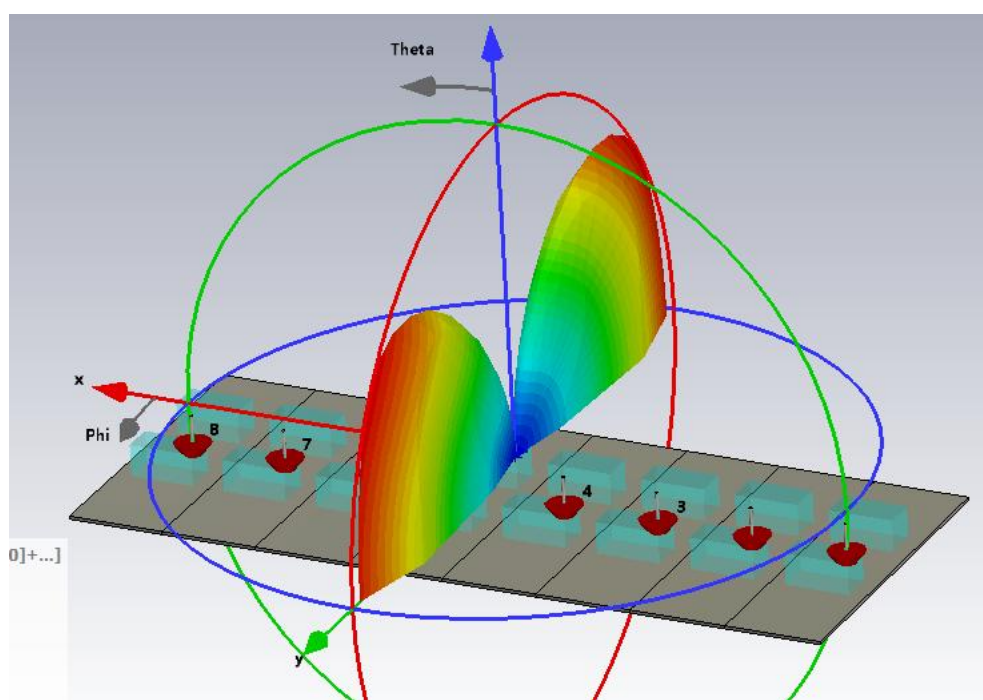


Рис. 5. ДН в линейном масштабе при синфазном возбуждении антенной решетки

Из рассмотрения ДН на рис. 4 и рис. 5 следует, что максимальное излучение антенной решетки направлено в противоположные стороны вдоль линии, перпендикулярной длине решетки. Последнее связано с тем, что элементом решетки является антенна на паре ДР, обладающей подобной ДН.

Отметим, что для того, чтобы выполнить сканирование главного луча антенной решетки следует правильно установить фазы сигналов питания, которые возбуждают отдельные элементы (пары ДР). Разность фаз Φ источников возбуждения соседних элементов ФАР зависит от расстояния между ними и от длины волны. Угол направления главного луча θ связан с углом Φ и приближенно записывается как:

$$\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta,$$

и при часто выбираемом расстоянии между элементами антенной решетки $d = \lambda/2$ получаем

$$\Phi = 180^\circ \times \sin \theta,$$

где d - расстояние между парами ДР, а λ - длина волны в свободном пространстве. Тогда при изменении фазы Φ с одним шагом набега от одного элемента к другому, направление излучения главного лепестка будет изменяться.

В таблице 1 приведена связь величин направления угла сканирования θ главного лепестка и разности фаз возбуждения Φ соседних элементов ФАР.

Таблица 1. Величины направления угла главного лепестка ЛАР при разности Φ фаз возбуждения соседних элементов ЛАР

θ	0	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Φ	0	31.3°	61.6°	90°	115.7°	137.9°	155.9°	169.1°	177.3°	180°

Выполним последовательно процедуру сканирования линейной антенной решетки. Как было показано на рис.4 - рис.5 для синфазного возбуждения элементов решетки луч главного лепестка ДН ориентирован перпендикулярно плоскости решетки (угол $\theta = 90^\circ$). При изменении разности фаз возбуждения между соседними парами ДР главный лепесток ДН сдвигается (рис. 6).

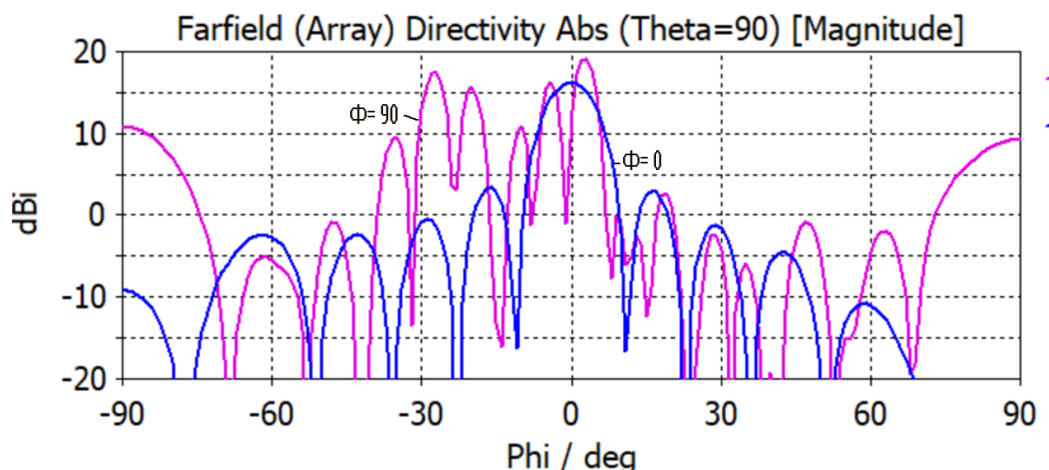


Рис. 6. ДН для двух разностей фаз возбуждения соседних элементов антенной решетки

Из картин ДН и данных рис. 6 следует, что одновременно с увеличением угла направления главного луча ДН наблюдается увеличение уровня боковых лепестков. Таким образом, диапазон углов сканирования для рассмотренной ФАР менее 40°, однако это может быть полезным в некоторых специальных приложениях. Результаты проведенного моделирования антенной линейной решетки получены с помощью программы CST SUITE [15].

Антенные системы на беспилотных летательных аппаратах (рис. 7) представляют в настоящее время сложные конструкции, которые выполняют роль приема, передачи и обработки данных, связывающих БПЛА с командным пунктом, с навигационными системами, находящимися на спутниках, самолетах наведения, а также слежения за поражающими объектами, объектами противодействия во время ведения боя и др. функции.

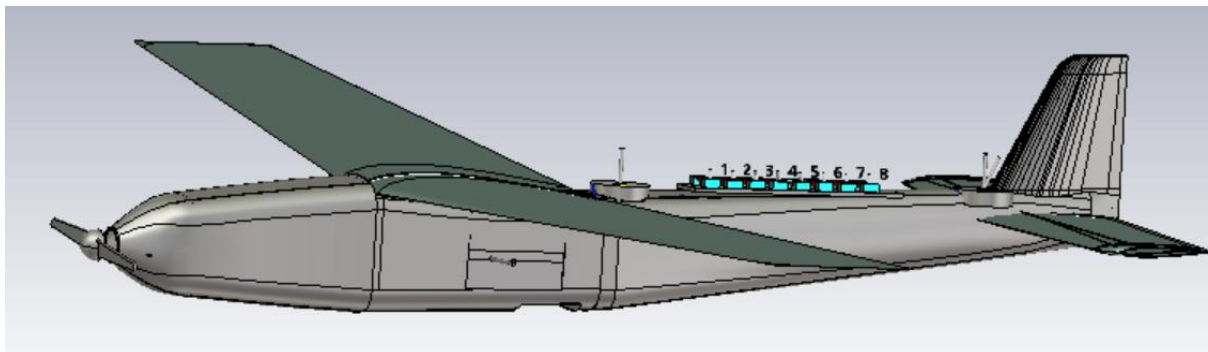


Рис. 7. БПЛА и установленная на его корпусе антенная решетка из 8-х пар ДР

В рамках освоения СВЧ и КВЧ диапазона актуальным является разработка антенных систем на БПЛА, работающим в диапазоне см и мм волн.

При увеличении кол-ва элементов ФАР имеет место сужение диаграммы направленности в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей сдвоенные ДР, что характерно для линейной антенной решетки из двух излучателей. Однако, в случае сдвоенных ДР используется единственный источник возбуждения пары ДР, что существенно отличает антенну на сдвоенных ДР от антенной решетки из двух излучающих элементов с двумя источниками возбуждения.

Выводы. Полученные результаты моделирования основных характеристик фазированной линейной антенной решетки на сдвоенных диэлектрических резонаторах (ДР), установленных на металлической пластине и возбуждаемых коаксиальным зондом свидетельствуют о возможности эффективного применения данной конструкции антенной решетки в качестве малогабаритных антенн с высокими параметрами эффективности излучения. Приведены характеристики излучения линейной антенной решетки на рабочем типе колебаний ДР, диаграммы направленности при сканировании главного луча фазированной решетки. Отмечена возможность установки такой антенной решетки на БПЛА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Richtmyer, R. D. Dielectric resonators / R. D. Richtmyer // Journal of Applied Physics. – 1939. – V. 10. – P.391-398.
2. Microstrip-fed array of multisegment dielectric resonator antennas / A. Petosa [et al.] // IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation. – 1997. – V. 144. – №. 6. – P. 472-476.
3. Two-dimensional cylindrical dielectric resonator antenna array / K. W. Leung [et al.] // Electronics Letters. – 1998. – V. 34. – №. 13. – P. 1283-1285.
4. Drossos, G. Implementation of four-element linear arrays using microstrip-coupled cylindrical dielectric resonator antennas / G. Drossos, Z. Wu, L. E. Davis // Microwave and Optical Technology Letters. – 1998. – V. 19. – №. 5. – P. 375-379.
5. Алексейчик, Л. В. Исследование миниатюрных диэлектрических СВЧ резонаторов в качестве антенных СВЧ элементов / Л. В. Алексейчик, В. М. Геворкян, Е. И. Калугин // Труды МЭИ. – 1981. – Вып. 528. – С. 31-40.
6. Long, S. A. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna / S. A. Long, M. W. McAllister, L. C. Shen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1983. – V. 31, № 3. – P. 406-412.

7. Luk, K. M. Dielectric Resonant Antenna / K. M. Luk, K. W. Leung // Research Studies Press, 2003. – 408 p.
8. Huitema, L. Dielectric materials for compact dielectric resonator antenna applications / L. Huitema, T. Monediere // Dielectric Material. – 2012. – V. 2. – P. 28-58.
9. Dielectric Resonator Antennas: Designs and Advances / D. Soren, R. Ghatak, R. K. Mishra, D. R. Poddar // Progress In Electromagnetics Research B. – 2014. –V. 60. – P. 195-213.
10. Keyrouz, L. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies / L. Keyrouz, D. Caratelli // International Journal of Antennas and Propagation. – V. 2016. – 20 p. –DOI 10.1155/2016/6075680.
11. Патент № 2789727 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 9/04. микроволновая антенна на диэлектрических резонаторах: № 2022121320 : заявл. 04.08.2022 : опубл. 07.02.2023 / Л. В. Алексейчик, А. А. Курушин ; заявитель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"». – EDN QSEWPM.
12. Petosa, A. Rectangular dielectric resonator antennas with enhanced gain / A. Petosa, S. Thirakoune // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – V. 59. – №. 4. – P. 1385-1389.
13. Malheiros-Silveira, G. N. Dielectric resonator nanoantenna coupled to metallic coplanar waveguide / G. N. Malheiros-Silveira, H. E. Hernandez-Figueroa // IEEE Photonics Journal. – 2015. – V. 7, №. 1. – P. 1–7.
14. Алексейчик, Л. В. Моделирование линейной антенной решетки на диэлектрических резонаторах СВЧ / Л. В. Алексейчик, М. П. Жохова, А. А. Курушин / Труды XXXIII Международной Конференции «Электромагнитное поле и материалы» // – М.: НИУ «МЭИ», 2025. – С. 428-434.
15. Алексейчик, Л. В. Комплексное моделирование в программе CST SUITE / Л. В. Алексейчик, А. А. Курушин. – М: Солон-Пресс, 2022. – 276 с.

Поступила в редакцию 28.08.2025 г., рекомендована к печати 12.09.2025 г.

MODELING OF A PHASED ARRAY ANTENNA BASED ON DUAL DIELECTRIC RESONATORS WITH PROBE EXCITATION

Alekseichik L.V., Kurushin A.A.

The results of modeling the basic electrical characteristics of a Phased Array Antenna on double dielectric resonators (DR) mounted on a metal plate and excited by a coaxial probe are presented. The radiation characteristics of the linear antenna array on the operating type of DR oscillations, as well as the distribution patterns of vector electric and magnetic fields of the near-field and the radiation patterns when scanning the main beam of the phased array, are given. The possibility of installing such an antenna array on an UAV is noted.

Keywords: microwave antennas, dielectric resonators, probe excitation, numerical simulation methods, unmanned aerial vehicles, CST SUITE.

Алексейчик Леонард Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных машин, систем и сетей ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,

Российская Федерация, г. Москва.

E-mail: alexeychiklv@mpei.ru

Alekseichik Leonard Valentinovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Departments of Computing Machines, Systems and Networks of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,

Российская Федерация, г. Москва.

E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Radio Technical Devices and Antenna Systems of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЕЙ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ© 2025 *Финошин Н.В., Попова А.Е.*

В данной работе проведены экспериментальные исследования распределения профилей средней скорости в выходном сечении конфузора аэродинамической трубы прямого действия при отсутствии форкамеры, хонейкомба и сеток.

Ключевые слова: профиль скорости, аэродинамическая труба, гидродинамическое сопротивление.

Введение. Характер течения жидкости или газа в пристеночной зоне как круглых цилиндрических труб, так и труб переменного сечения влияет прежде всего на коэффициенты полного гидродинамического сопротивления в этих трубах, а также на интенсивность теплоотдачи. Для исследования характеристик воздушного потока в пристеночной зоне трубопроводов используются напорные микротрубки Пито-Прандтля и термоанемометры. Для градуировки этих средств измерения необходимо создать равномерный, прямолинейный поток воздуха с помощью аэродинамических труб. В данной работе приведено исследование неоднородности полей средней скорости в рабочей части вновь разработанной и изготовленной аэродинамической трубы.

Схема установки. Используя рекомендации [1] был проведен расчет элементов аэродинамической трубы прямого действия (АТ-0,075-Пр): входной диффузор, форкамера, конфузор. Все элементы трубы были изготовлены на 3D принтере. На рисунке 1 приведена схема АТ-0,075-Пр.

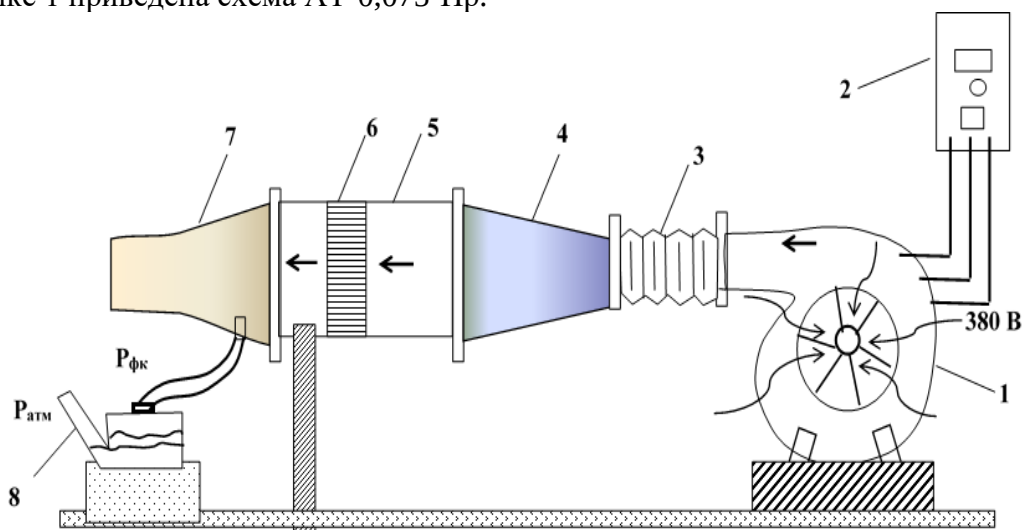


Рис. 1. Схема аэродинамической трубы прямого действия:

1 – высоконапорный вентилятор ВВД-5; 2 – частотный преобразователь; 3 – гофрированная труба; 4 – диффузор; 5- форкамера; 6 – хонейкомб; 7 – конфузор; 8 – микроанометр ММН-2400

Схема (рис. 1) состоит из вентилятора высокого давления 1 ВВД-5, скорость потока регулируется частотным преобразователем 2. Поток воздуха из вентилятора 1 поступает через гофрированную трубу 3 в диффузор 4. Гофрированная труба 3 позволяет устранить пульсации, создаваемые вентилятором. Из диффузора 4 поток воздуха поступает в форкамеру 5, где предполагается установить хонейкомб 6, который позволит разбить крупные вихри на более мелкие и тем самым устранить неравномерность профиля средней скорости ещё до входа в конфузор 7. Конфузор 7 предназначен для увеличения скорости воздушного потока и дальнейшего уменьшения неравномерности профиля скорости в выходном сечении конфузора. Для контроля разности давлений между входом в конфузор и выходом из него – подключен микроманометр ММН-2400, класса точности 1.

Диаметр входного сечения конфузора составляет $d_{вх} = 250 \text{ мм}$, выходного сечения $d_{вых} = 75 \text{ мм}$. Поднятие конфузора составляет $n = \frac{F_1}{F_2} = 11,1$, где F_1 – площадь

входного сечения в конфузор, м^2 ; F_2 – площадь выходного сечения конфузора, м^2 .

Задача исследования заключалась в измерении поля средней скорости в выходном сечении конфузора АТ-0,075-Пр. При этом в форкамере не были установлены устройства для выравнивания неоднородности профилей средней скорости (решетки, хонейкомб, сетки).

Необходимо было определить зоны неравномерности профилей скорости, чтобы еще до входа потока воздуха в форкамеру эти зоны неравномерностей профилей скорости по возможности уменьшить, чтобы потом установить в форкамере рассчитанный хонейкомб [2].

Схема точек измерения скорости воздушного потока на срезе конфузора АТ-0,075-Пр приведена на рисунке 2.

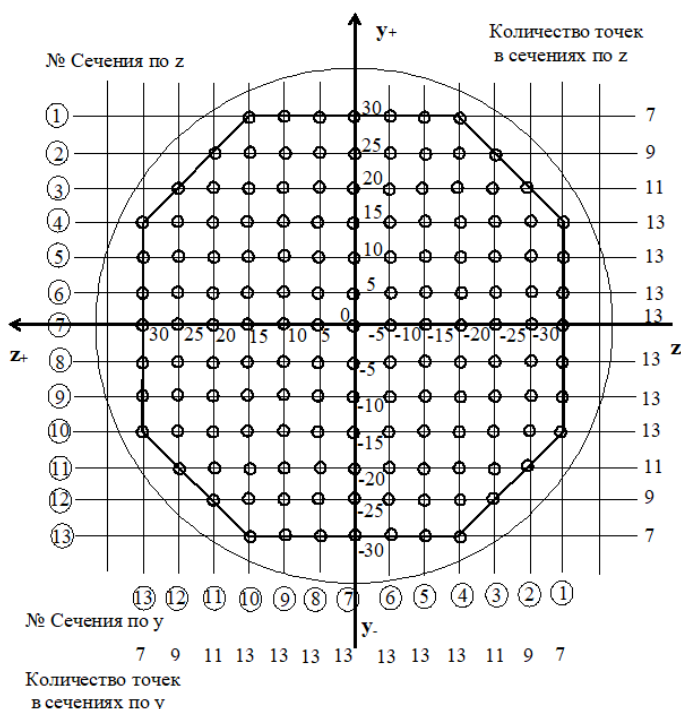


Рис. 2. Схема точек измерения скорости воздушного потока в выходном сечении конфузора АТ прямого действия (без хонейкомба в форкамере); 13 сечений; 145 точек

Были выбраны по 13 сечений по осям координат Oz и Oy , с шагом по каждой из осей $\Delta z = \Delta y = 5 \text{ мм}$, при этом количество точек измерения составило 145. Измерение скорости в каждой точке потока осуществлялось с помощью напорной микротрубки Пито-Прандтля, позволяющей измерять скорости воздушного потока в пристеночной зоне с прямолинейной и криволинейной стенками. Схема напорной микротрубки Пито-Прандтля приведена на рисунке 3.

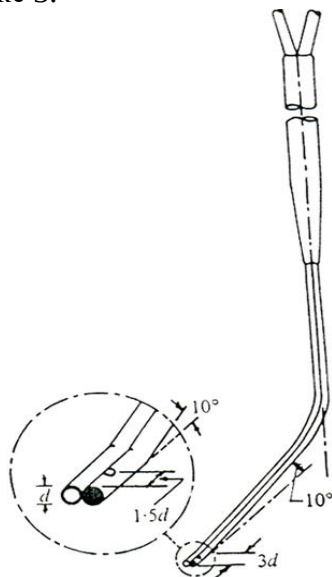


Рис. 3. Схема напорной микротрубки:

$d = 1,3 \text{ мм}$ – наружный диаметр капилляра;

$3d = 3,9 \text{ мм}$ – длина горизонтальной части носика;

$1,5d = 1,95 \text{ мм}$ – расстояние от носика напорной трубки до места расположения статического отверстия (диаметр статического отверстия – $d_{ст.} = 0,3 \text{ мм}$);

угол наклона остальной носовой части напорной трубки к горизонтальной плоскости равен 10°

Для измерения разности полного и статического давлений на микротрубке использовался микроманометр ММН-2400 класса точности 1.0. Расчет значений скорости воздушного потока в каждой точке проводился по следующей формуле [3]:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot \xi}{\rho}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right),$$

где: ΔP – разность полного и статического давлений, измеренная микротрубкой Пито-Прандтля, Па ; ρ – плотность воздушного потока, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; ξ – градуировочный коэффициент микротрубки.

Значение ΔP рассчитывалось по следующей формуле:

$$\Delta P = A \cdot k \cdot 9,8 (\text{Па}),$$

где: A – отчет по шкале ММН-2400, мм ; k – коэффициент наклона трубки ММН-2400; 9,8 – коэффициент перевода давлений из $\frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$ в Па .

Плотность воздушного потока зависит от значений атмосферного давления и температуры потока. Во многих ГОСТах приводится следующая формула для расчета плотности воздуха ρ [4]:

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0}{B_0} \cdot \frac{B}{T}, \quad (1)$$

где: $\rho_0 = 1,225 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ при $T_0 = 288,15^\circ \text{K}$, при $t = 15^\circ \text{C}$; $B_0 = 101325 \text{Па}$; ρ_0, T_0, B_0 – плотность воздуха, температура и атмосферное давление при нормальных условиях; B, T – реальное атмосферное давление и температура воздуха в момент проведения измерений.

Из формулы (1) получаем:

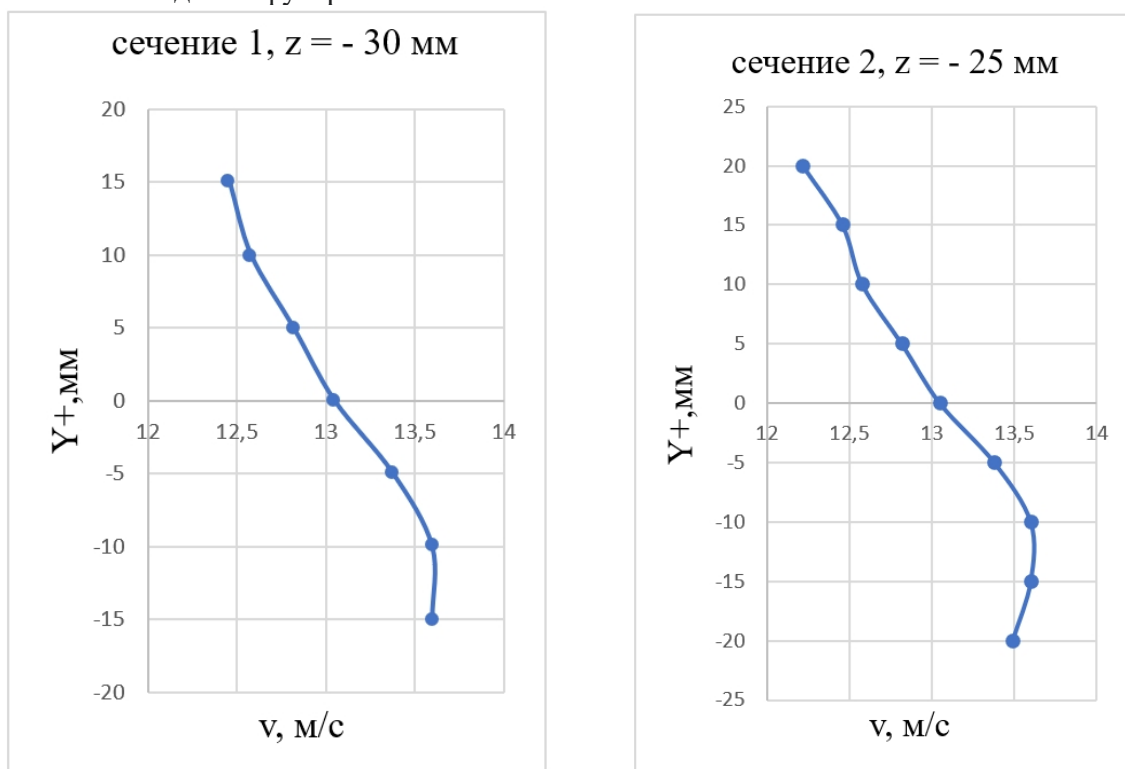
$$\rho = \frac{\rho_0 T_0}{B_0} \cdot \frac{B}{T} = \frac{1,225 \cdot 288,15}{101325} \cdot \frac{B}{T} = 0,00348 \cdot \frac{B}{T},$$

Таким образом, значение ρ в экспериментах вычислялось по формуле:

$$\rho = 0,00348 \cdot \frac{B}{T}.$$

Результаты экспериментальных исследований. На рисунках 4-7 приведены профили средней скорости воздушного потока на срезе конфузора АТ-0,075-Пр в 13 сечениях по координате Oy (вертикальная координата), в различных сечениях координаты по Oz (горизонтальная координата).

На рис. 4 приведены профили продольной скорости воздушного потока по координате Oy в сечениях 1,2,3,4 по координате Oz . Эти сечения представляют собой часть правой части выходного сечения конфузора. Из рис. 4 видно, что профили скорости в каждом из вертикальных сечений существенно неравномерные, максимальное значение скорости потока сосредоточено в нижней части правого сечения выхода конфузора.



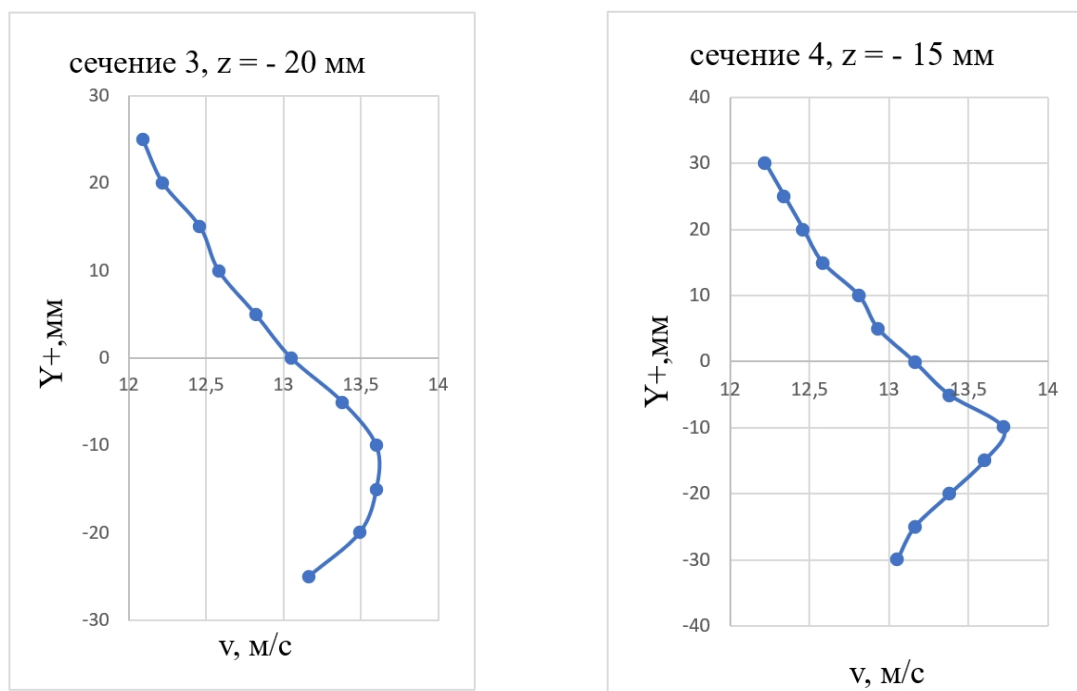
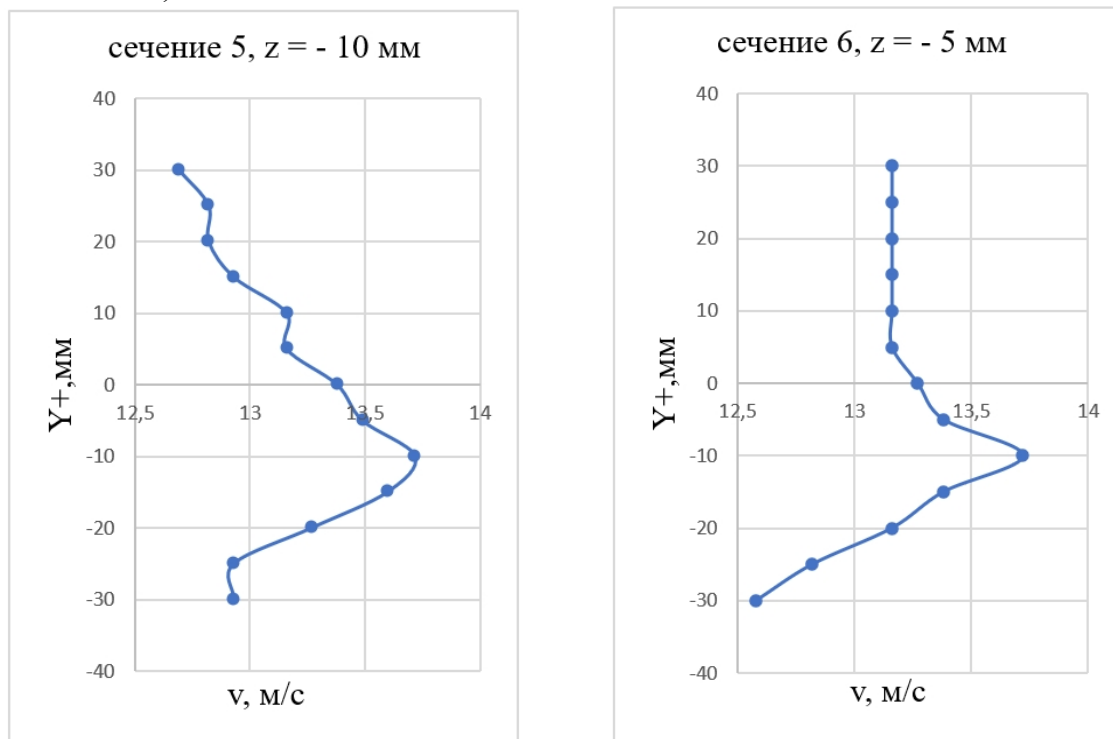


Рис. 4. Профили продольной скорости воздушного потока по координате Oy в различных сечениях Oz (сечения 1-4)

На рис. 5 приведены профили продольной скорости воздушного потока по координате Oy в сечениях 5, 6, 7, 8 по координате Oz . Видно, что в сечении 5 тенденция поведения профилей скорости сохраняется по аналогии в сечениях 1-4 (рис. 4).

В сечениях 5-8 профили скорости ведут себя следующим образом. В верхней правой части сечения конфузора значение скорости становится стабильно постоянной и составляет $13,16$ м/с.



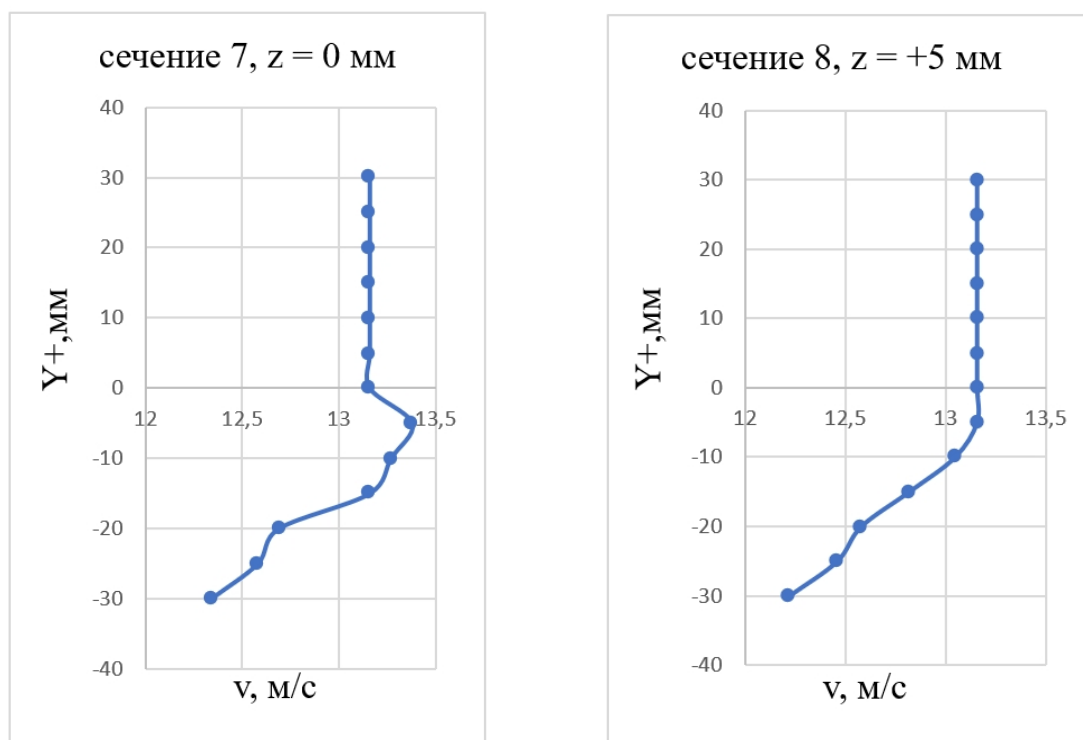
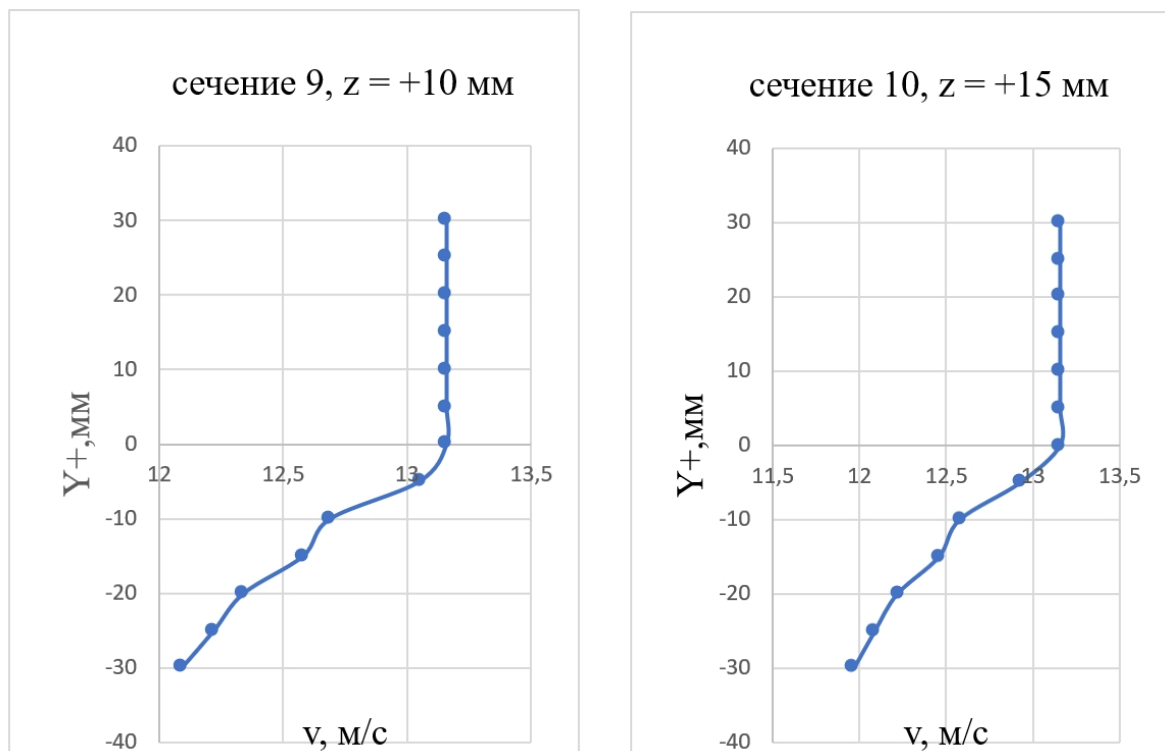


Рис. 5. Профили продольной скорости воздушного потока по координате Oy в различных сечениях Oz (сечения 5-8)

В нижней правой части сечение конфузора значение скорости существенно неравномерное.

Тенденция профилей скорости в сечениях 5-8 продолжается в сечениях 9-11 на рис. 6 и рис. 7 в сечениях 12-13.



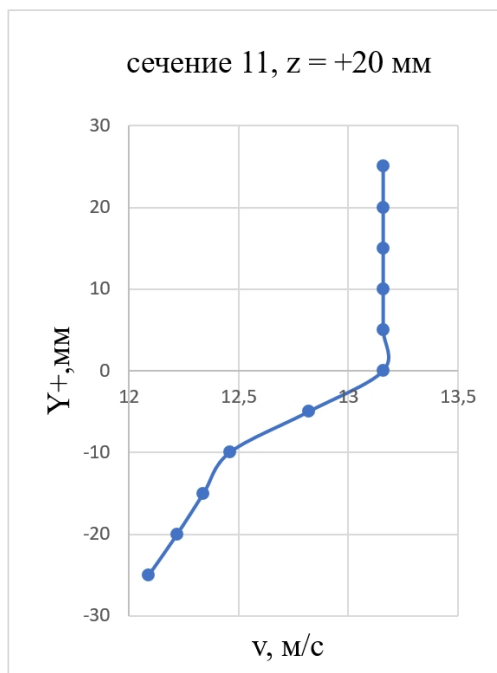


Рис. 6. Профили продольной скорости воздушного потока по координате Oy в различных сечениях Oz (сечения 9-11)

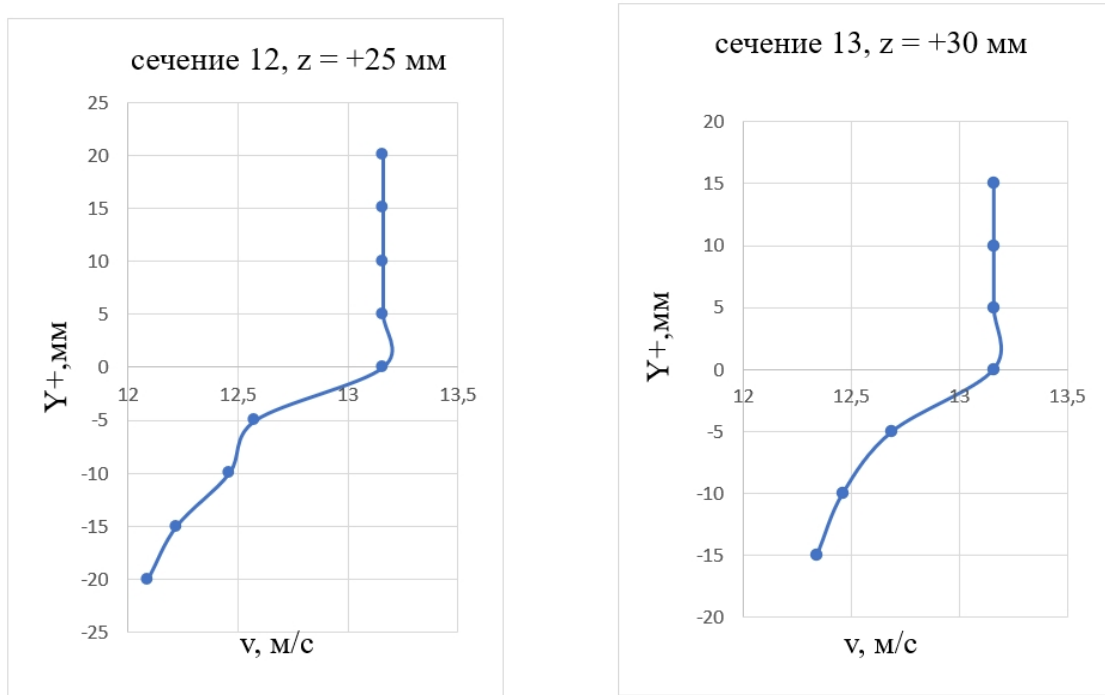


Рис. 7. Профили продольной скорости воздушного потока по координате Oy в различных сечениях Oz (сечения 12-13)

Для того чтобы более наглядно показать неравномерное распределение продольной скорости воздушного потока на выходе конфузора на рис. 8 показано распределение изолиний скорости.

Из рис. 8 видно, что в правой нижней части сечения существуют области с максимальными значениями скоростей от скорости $V = 13,72 \text{ м/с}$ до скорости $V = 13,34 \text{ м/с}$. Значение скорости $V = 13,16 \text{ м/с}$ занимает весь левый верхний участок сечения и частично присутствует в правой нижней части сечения.

Таким образом, на рис. 8 наглядно видно неравномерное распределение продольной скорости воздушного потока в выходном сечении конфузора.

Это явление связано с тем, что крупные вихри от вентилятора поступают через диффузор в форкамеру, в которой отсутствуют средства создания равномерного распределения скорости воздушного потока за счет разбиения крупных вихрей на более мелкие вихри.

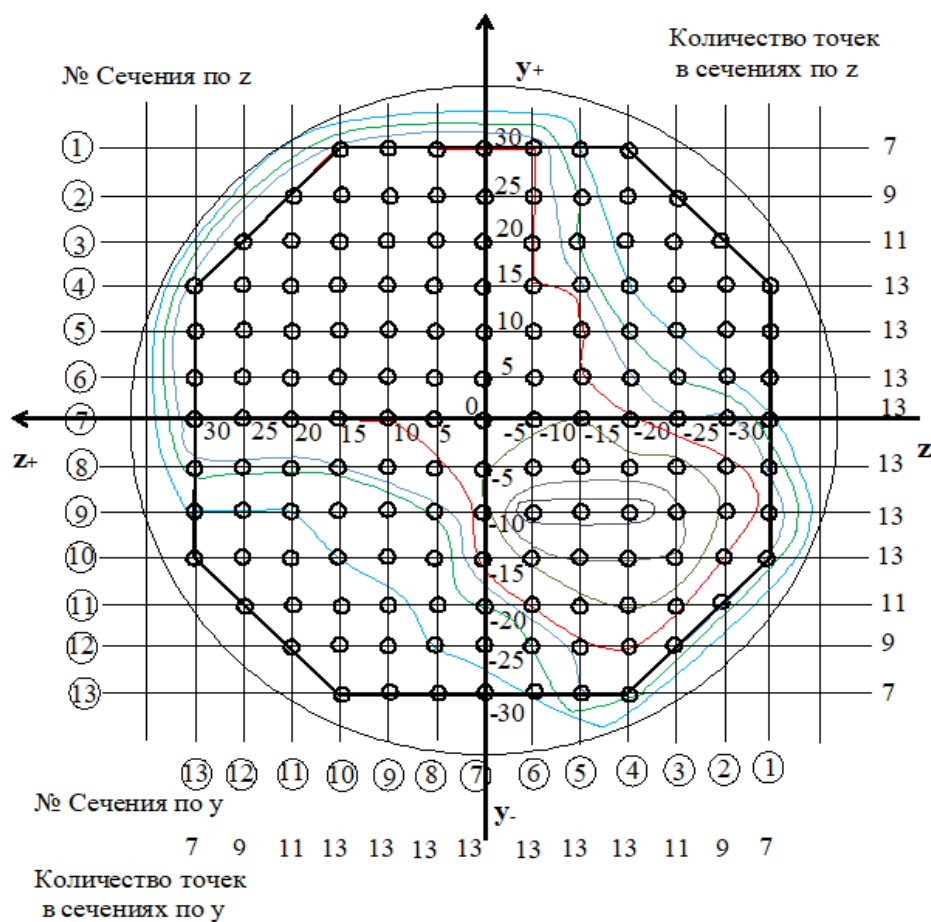


Рис. 8. Распределение изолиний скорости воздушного потока на выходе из конфузора:

- 1 $V = 13,72 \text{ м/с}$; 2 $V = 13,60 \text{ м/с}$; 3 $V = 13,34 \text{ м/с}$; 4 $V = 13,16 \text{ м/с}$;
5 $V = 12,93 \text{ м/с}$; 6 $V = 12,82 \text{ м/с}$; 7 $V = 12,46 \text{ м/с}$

Заключение. По результатам экспериментальных исследований установлено, что на выходе из конфузора профили скорости существенно неравномерные.

Для устранения неравномерности профилей скорости на выходе из конфузора необходимо рассчитать, изготовить, установить в форкамере хонейкомб, а также провести повторно экспериментальные исследования.

Для большего устранения неравномерности профилей скорости на выходе из конфузора после хонейкомба по направлению потока воздуха необходимо установить спрямляющую сетку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горлин, С. М. Аэромеханические измерения (методы и приборы) / С. М. Горлин, Н. И. Слезингер. – М.: Наука, 1964. – 720с.
2. Фиошин, Н. В. Профили скорости в трубах с периодически изменяющимся поперечным сечением (ТПИПС) / Н. В. Фиошин, А. Е. Попова // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции, Донецк, 16–18 мая 2016 года / Под общей редакцией С.В. Беспаловой. Том 1. – Донецк: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 197-200. – EDN YUAOJZ.
3. Повх, И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1974. – 479 с.
4. МИ–2000–89. Трубы аэродинамические малых дозвуковых скоростей. Методика метрологической аттестации: введен 1990-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 18 с.

Поступила в редакцию 01.09.2025 г., рекомендована к печати 18.09.2025 г.

INVESTIGATION OF THE INEQUALITY OF THE AVERAGE SPEED FIELDS IN THE WORKING PART OF A DIRECT-ACTION AERODYNAMIC PIPE

Finoshin N.V., Popova A.E.

In this work, experimental studies of the distribution of average velocity profiles in the outlet section of a direct-action wind tunnel confuser in the absence of a forecamer, honeycomb, and nets are carried out.

Keywords: velocity profile, wind tunnel, hydrodynamic resistance.

Фиошин Николай Васильевич

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры физики неравновесных
процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: finoshin@donnu.ru

Finoshin Nikolai Vasilevich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the
Department of Physics of Nonequilibrium Processes,
Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of
Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Попова Альбина Евгеньевна

заведующая учебно-исследовательской
лабораторией аэродинамических измерений
кафедры физики неравновесных процессов,
метрологии и экологии им. И.Л. Повха
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: a.popova@donnu.ru

Popova Albina Evgenevna

Head of the Research Laboratory of Aerodynamic
Measurements at the Department of Physics of
Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology
named after I.L. Povkh of Donetsk State University.
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2025 Шелехова О.Г.

Разработан упрощенный метод оценки показателей надежности на этапе проектирования и в процессе эксплуатации радиотехнических устройств.

Ключевые слова: надежность, алгоритм нахождения надежности, вероятность безотказной работы, радиотехнические устройства.

Введение. Эксплуатация радиотехнических устройств (РТУ) зачастую сопровождается отказами, связанными с перегревом отдельных элементов их конструкции [1–9]. Деградиционные эффекты, связанные с превышением допусков теплового режима приводят к необратимым повреждениям элементов конструкции и являются наиболее частой причиной катастрофических отказов РТУ [10–20].

Значение и относительный объем РТУ в технических системах постоянно увеличивается [5–6] и в настоящее время радиотехнические устройства активно используются практически во всех отраслях науки и техники, в том числе атомной, космической и военной, топливно-энергетической промышленности и др. [5].

Одним из важных факторов, имеющих существенное влияние на надежность радиотехнических устройств (РТУ) является температура окружающей среды [5]. Статистика отказов показывает рост выхода из строя оборудования в летний период, находящегося как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе [5]. Проблема влияния температуры окружающей среды рассмотрены в работах [1–5].

Методы обеспечения безопасности и надежности работы РТУ рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов [9, 12, 21–31]. Существующие методы определения срока эксплуатации и надежности электронных устройств носят вероятностный характер [8], и могут давать высокую погрешность при определении надежности [8]. РТУ могут состоять из миллиона элементов [8], надежность каждого из которых, в свою очередь, определяется громоздкими аналитическими выражениями [1]. Расчет срока службы подобных РТУ, даже с использованием специализированных компьютерных программ может занимать длительное время [1], что не позволяет своевременно принять решение по замене РТУ или его комплектующих.

Значительный интерес представляет разработка достаточно точных и простых в использовании выражений, для определения срока службы и надежности радиотехнических устройств, которые по известным значениям температуры в элементах конструкции устройства позволят оценить показатели надежности РТУ при различных значениях температуры в элементах его конструкции.

Целью данной статьи является разработка упрощенного метода оценки надежности РТУ при повышении температуры окружающей среды на этапе проектирования и в процессе эксплуатации.

В настоящее время основной характеристикой безотказности элементов, приводимой в справочной литературе, является эксплуатационная интенсивность отказов λ [8–17].

Расчёт поправочных коэффициентов выполняется с использованием методики прогнозирования эксплуатационной безотказности элементов, представленной в работах [7–9]:

$$\lambda_{\mathfrak{g}} = \lambda_{\mathfrak{g}i} \prod_{n=0}^{N-1} K_i,$$

где n – количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов, K_i коэффициенты учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов при различных условиях работы.

Одним из важных факторов, имеющих существенное влияние на надежность радиотехнических устройств (РТУ) является температура окружающей среды [10–14, 16, 19].

Разработку метода оценки надежности РТУ при повышении температуры окружающей среды на показатели надежности РТУ рассмотрим на примере детектора денежных банкнот (рис. 1) [8].

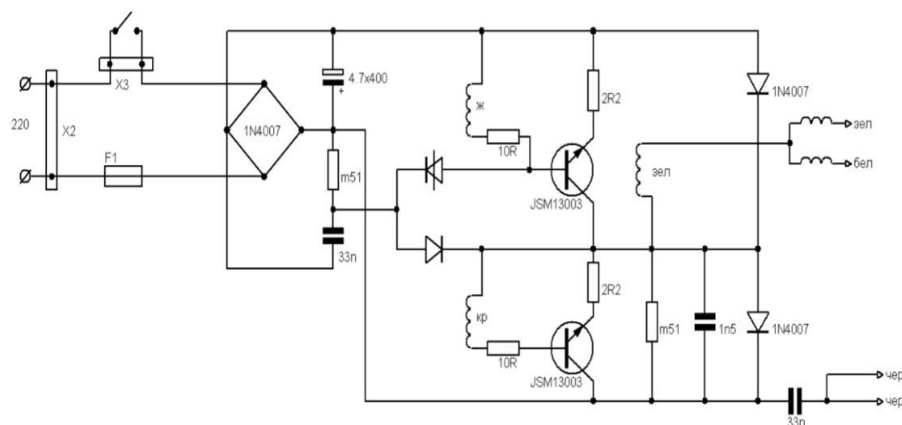


Рис. 1. Схема детектора денежных купюр

Графики зависимости интенсивности отказов элементов конструкции детектора от температуры окружающей среды, полученные в ходе предшествующих исследований [8] представлены на рисунке 2.

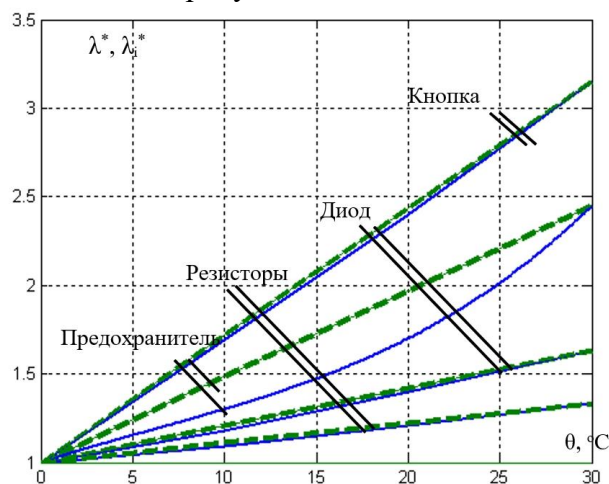


Рис. 2. Графики относительных значений интенсивности отказов (λ^*) (—) и их аппроксимированные зависимости (---) при различных значениях температуры окружающей среды (θ)

В ходе проведенных в работе исследований была доказана возможность упрощенного расчета показателей надежности на основе аппроксимации функций интенсивностей отказов элементов конструкции рассматриваемого детектора $\lambda_i(\theta) = f(\theta)$ упрощенными линейными выражениями вида (рис. 2, табл. 1):

$$\lambda_i(\theta) = K_i \cdot \theta + B_i,$$

где K_i , B_i – абсолютные значения параметров аппроксимирующих полиномов первой степени для i -того элемента детектора.

Таблица 1. Аппроксимирующие полиномы первой степени для элементов конструкции детектора денежных банкнот при различных значениях температуры окружающей среды ($0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 30^\circ\text{C}$)

Элементы	Аппроксимация функции $\lambda_i^*(\theta) = f(\theta)$ полиномом первой степени	K_i^*	Погрешность, %			
			$\theta = 0^\circ\text{C}$	$\theta = 10^\circ\text{C}$	$\theta = 20^\circ\text{C}$	$\theta = 30^\circ\text{C}$
Кнопка	$\lambda_1^*(\theta) = K_1^* \cdot \theta + 1.00$	0,072	0	6,04	1,49	0,12
Предохранитель	$\lambda_2^*(\theta) = K_2^* \cdot \theta + 1.00$	0,069	0	14,13	15,73	0,05
Тиристор	$\lambda_3^*(\theta) = K_3^* \cdot \theta + 1.00$	0,021	0	2,55	1,43	0,01
Диод	$\lambda_4^*(\theta) = K_4^* \cdot \theta + 1.00$	0,019	0	2,05	1,23	0,03
Транзистор	$\lambda_5^*(\theta) = K_5^* \cdot \theta + 1.00$	0,011	0	1,84	0,82	0,01
Резистор	$\lambda_6^*(\theta) = K_6^* \cdot \theta + 1.00$	0,008	0	1,40	0,92	0,02
Конденсатор	$\lambda_7^*(\theta) = K_7^* \cdot \theta + 1.00$	0,004	0	1,45	0,62	0,03

В качестве базовых приняты значения интенсивностей отказов при температуре окружающей среды $\theta = 0^\circ\text{C}$. Тогда параметр B_i для элементов конструкции детектора при линейной аппроксимации в абсолютных и относительных единицах соответственно:

$$\lambda_i(0) = K_i \cdot 0 + B_i,$$

$$B_i^* = 1.$$

Аппроксимирующий полином первой степени (2) в относительных единицах будет иметь вид (табл. 1):

$$\lambda_i^*(\theta) = K_i^* \cdot \theta + 1, \quad (1)$$

где $K_i^* = K_i / \lambda_{Bi}$.

В качестве примера в табл. 1 представлены аппроксимирующие полиномы первой степени для элементов конструкции детектора денежных банкнот. В табл. 1 приведены также величины погрешности при определении интенсивности отказов с использованием выражений (1).

Из анализа результатов представленных в таблице 1 и на рисунке 2 следует, что чем выше K_i^* , тем выше интенсивность отказов соответствующего элемента. Например, при температуре окружающей среды $\theta = 30^\circ\text{C}$ рост интенсивности отказов элементов с для кнопки с $K_1^* = 0,072$ составляет 3.2 раз, для предохранителя с $K_2^* = 0,069$ составляет 2.45 раз, для диода с $K_4^* = 0,019$ составляет 1.62 раз и т.д.

Из анализа результатов, представленных в таблице 1 следует, что погрешность расчета интенсивности отказов с использованием линейной аппроксимации для резисторов и конденсаторов до 1,5%, для диодов и конденсаторов – до 6%, для кнопок – до 6,1%, для предохранителей – до 16% и т. д. (табл. 1).

Использование аппроксимирующего полинома первой степени позволяет получить упрощенные выражения для нахождения интенсивностей отказов элементов конструкции рассматриваемого диапазоне температур $0^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 30^{\circ}\text{C}$ с погрешностью, не превышающей 16%.

Срок службы i -ого элемента рассматриваемого детектора в абсолютных и относительных единицах (рис. 3):

$$T_{0i}(\theta) = \frac{1}{K_i \cdot \theta + B_i}; \quad T_{0i}^*(\theta) = \frac{K_i \cdot 0 + B_i}{K_i \cdot \theta + B_i} = \frac{B_i}{K_i \cdot \theta + B_i} = \frac{1}{K_i^* \cdot \theta + 1.00}. \quad (2)$$

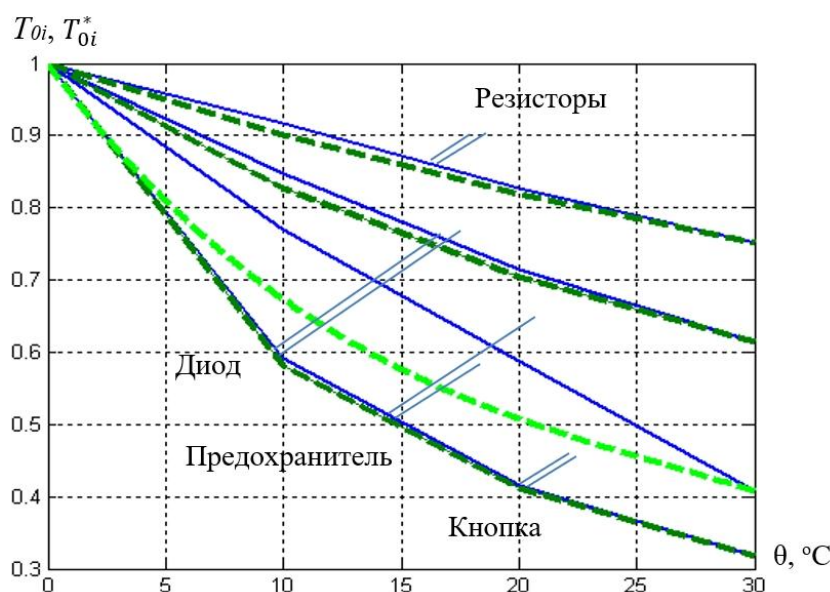


Рис. 3. Графики относительных значений наработки на отказ ($T_{0i}^*(\theta)$) (—), построенные с использованием выражения (2) (---) при различных значениях температуры (θ)

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 3 следует, что при увеличении температуры окружающей среды $0^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 30^{\circ}\text{C}$, чем выше K_i^* , тем ниже срок безаварийной эксплуатации РТУ. Например, при $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ срок службы резистора с $K_6^* = 0.008$ сокращается на 23%, а для предохранителя с $K_2^* = 0.069$ сокращается на 59 % и т.д. Погрешность нахождения наработки на отказ в соответствии с упрощенным алгоритмом (2) не превышает 11%.

Вероятность безотказной работы i -ого элемента рассматриваемого детектора в абсолютных и относительных единицах соответственно равны:

$$P_i(t, \theta) = e^{-\lambda_i t} = e^{-(K_i \cdot \theta + B_i)t} = e^{-(K_i \cdot \theta + \lambda_{Bi})t},$$

$$P_i^*(t, \theta) = \frac{e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_{Bi} t}} = e^{-(K_i \cdot \theta + \lambda_{Bi} - \lambda_{Bi})t} = e^{-K_i \cdot \theta t}. \quad (3)$$

Приведенные выше выражения (1-3) могут быть использованы, для оценки показателей надежности элементов конструкции, и радиотехнических устройств в целом. Например, для детектора (рис. 1) коэффициент $K^* = 0.018$ и параметры надежности в соответствии с упрощенным методом оценки определяются выражениями:

$$\lambda^*(\theta) = 0,018 \cdot \theta + 1,00; \quad (4)$$

$$T_0^*(\theta) = \frac{1}{0,018 \cdot \theta + 1,00}; \quad (5)$$

$$P^*(t, \theta) = e^{-0,018 \lambda_B \cdot \theta t}. \quad (6)$$

Показатели надежности детектора, вычисленные точным аналитическим методом [21] и с использованием предложенного в статье упрощенного метода оценки (на основании выражений (4-6)) при различных значениях температуры окружающей среды, приведены в таблице 2. В качестве базовых значений показателей надежности (табл. 2) приняты их соответствующие значения при 0°C .

Таблица 2. Сравнительный анализ оценки надежности детектора:
1 – методом аналитических зависимостей, 2 - упрощенным методом оценки

Температура	$\theta = 0^\circ\text{C}$		$\theta = 10^\circ\text{C}$		$\theta = 20^\circ\text{C}$		$\theta = 30^\circ\text{C}$	
Метод	1	2	1	2	1	2	1	2
$\lambda^* \lambda^*$	1,00	1,00	1,11	1,18	1,32	1,36	1,54	1,54
$T_0^* T_0^*$	1,00	1,00	0,90	0,85	0,76	0,74	0,85	0,84
$P^* P, \%$	100	100	93,4	92,5	92,7	90,7	91,3	88,1

Таким образом, выражения (4-6), полученные с использованием предложенного метода оценки надежности мало отличаются от данных, полученных методом аналитических зависимостей.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований и расчетов разработан упрощенный метод оценки показателей надежности радиотехнических устройств.

Использование предложенного метода позволяет:

1. Оценить показатели надежности РТУ при различных значениях температуры окружающей среды на этапе проектирования и в процессе эксплуатации.
2. Выявить целесообразность замены отдельных РТУ или их комплектующих более надежными аналогами на этапе проектирования или эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, В. П. Методика автоматизированного проектирования термоустойчивых радиотехнических устройств (РТУ) с учетом теплового режима / В. П. Алексеев // Научно-практический журнал «Новые исследования в разработке техники и технологий» – № 2. – 2017. – С. 26–40.
2. Храмцов, М. В. Устройства подогрева электронной компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры в условиях отрицательных температур / М. В. Храмцов, А. М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР, – 2022. – Том 25. – № 3 – С. 28–36.

3. Смирнов, В. И. Методы и средства измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов интегральных и интегральных схем / В. И. Смирнов, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 1. – С. 22–27.
4. Zhechev, Y. S. The analysis of shielding effectiveness of the enclosure of an EMI-filter for a spacecraft power bus. / Y. S. Zhechev, A. M. Zabolotsky // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2021. – V. 15. – P. 470–475.
5. Разработка устройства защиты от сверхкоротких импульсов для цепей электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры / В. П. Костелецкий, Е. Б. Черникова, Е. С. Жечев, А. М. Заболоцкий // Журнал радиоэлектроники – №8 – 2022 – С. 4–19.
6. Воздействие внешних условий на работоспособность радиоэлектронных средств (РЭС) / Д. В. Столбинский, П. П. Бем, В. А. Андреев, Д. В. Матвеев // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 18–22.
7. Сучков, К. И. Развитие системных мероприятий управления качеством и надежностью электронной компонентной базы по направлениям сбора, обработки и анализа информации с этапов производства, применения и эксплуатации / К. И. Сучков, А. А. Невский, Ю. В. Рубцов // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. – 2021. – № 1. – С. 4–7.
8. Шелехова, О. Г. Оценка влияния температуры окружающей среды на показатели надёжности детектора банкнот / О. Г. Шелехова, В. Р. Кущенко, Д. В. Попадин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 17–23. – EDN BOBLVX.
9. Кузьма, А. Ю. Отказы светодиодных приборов и способы повышения их надежности / А. Ю. Кузьма // Актуальные проблемы энергетики. СНТК. – № 73. – С. 453–457.
10. Никифоров, С. Н. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 1 / С. Н. Никифоров // Компоненты и технологии. – № 9. – 2005. – С. 140–146.
11. Срок службы сверхярких светодиодов. Причины отказов [Электронный ресурс]. – URL: <http://led22.ru/ledstat/otkazisvetodiodov/otkazi-svetodiodov.html> (дата обращения 11.07.2025).
12. Калякулин, А. Н. Решение проблемы перегрева силовых диодов на электровозе 2ЭС6 / А. Н. Калякулин, А. С. Тычков, А. Г. Старикова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 502–505. – EDN JAODYZ.
13. Ковалев, А. П. Факторы, определяющие надежность и долговечность конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (информационное исследование). / А. П. Ковалев, В. П. Алексеев // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т.13. – С. 1006–1010.
14. Юрков, Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры / Н. К. Юрков // НИКСС. – 2021. – №4(36). – С. 5–13.
15. Чумаков, В. Н. Методы моделирования тепловых повреждений полупроводниковых приборов / В. Н. Чумаков // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – №2. – С. 31–37.
16. Нечаев, В. Г. Пассивная компенсация температурной нестабильности сверхвысокочастотных диодных детекторов мощности / В. Г. Нечаев, А. С. Загородний, А. М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР. – 2023. – Том 26. – № 3 – С. 20–26.
17. Применение термического анализа при исследовании и экспертизе пожаров: Методические рекомендации. / Е. Д. Андреева, М. Ю. Принцева, С. А. Кондратьев, И. Д. Чешко. – СПб.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, – 2010. – 275 с.
18. Дашко, Л. В. Экспертное исследование наиболее распространенных объектов пожарно-технической экспертизы с применением метода термического анализа: учебное пособие / Л. В. Дашко, В. Ю. Ключников. – М.: ЭКЦ МВД России, 2016. – 188 с.
19. Мартынов, И. А. Измерение теплового сопротивления кристалл–корпус микросхем и полупроводниковых приборов с использованием тепловизора / И. А. Мартынов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 4. – С.3–6.
20. Сергеева, В. А. Способ измерения тепловых параметров полупроводниковых изделий в составе электронного модуля / В. А. Сергеева, Р. Г. Тарасов // Труды Международного симпозиума "Надежность и качество". – Т. 2. – Пенза, 2020. – С.183–185.
21. Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
22. Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств. / С. М. Лышов, С. У. Увайсов, В. В. Черновверская, Ф. К. Хань // Российский технологический журнал. – 2021. – Том 9. – №2. – С. 44–56.

23. Гойденко, В. К. Методика теплового контроля и диагностирования современных программно-аппаратных комплексов связи / В. К. Гойденко // Техника средств связи. – №1(145). – 2019. – С. 95–100.
24. Инженерная методика вибродиагностики конструкций бортовых радиоэлектронных средств / С. М. Лышов, С. У. Увайсов, В. В. Черновская, Ф. К. Хань // Научные технологии. – 2020. – Том 21. – №2–3. – С. 17–29.
25. Искусственная нейронная сеть в задаче диагностики дефектов конструкций печатных узлов электронных средств. / С. У. Увайсов, В. В. Черновская, С. М. Лышов, Увайсова А.С. // Научные технологии. – 2020. – Том 21. – №10. – С. 29–39.
26. Строгонов, А. В. Анализ методов расчета эксплуатационной интенсивности отказов / А. В. Строгонов, М. М. Белых, Д. В. Пермяков // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2022. – №1 (00212). – С. 122–129.
27. Жаднов, В. В. Сравнительный анализ методов оценки надежности полупроводниковых интегральных микросхем / В. В. Жаднов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2013. – № 16 – С. 132–137.
28. Панычев, С. Н. Совершенствование принципов построения и методов оценки характеристик радиотехнических систем ближнего действия: дис. ... д-р техн. наук: 05.12.04 / Панычев Сергей Николаевич; ВГТУ. – Воронеж, 2009. – 370 с.
29. Тихменев, А. Н. Модели и методика для анализа надежности отказоустойчивой бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. Н. Тихменев // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2013. – № 1. – С. 410–414.
30. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, Д. В. Лихачевский // Big Data and Advanced Analytics. – 2020. – № 6-3. – С. 282–286.
31. Kofanov, Y. Evidence-Based Modeling of Thermal Processes in Printed Circuit Assemblies of Optoelectronic Devices / Y. Kofanov, N. Kuznetsov, S. Sotnikova // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). – IEEE, 2021. – P. 1–4.
32. Thermal computer modeling of laser gyros at the design stage: a promising way to improve their quality and increase the economic efficiency of their development and production / Kuznetsov E., Y. Golyaev, Y. Kolbas [et al.] // Optical and Quantum Electronics. Switzerland: Springer, 2021. – Vol. 53, Is. 10. – Art. number 596. – P. 1–15.

Поступила в редакцию 15.09.2025 г., рекомендована к печати 09.10.2025 г.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF RADIO ENGINEERING DEVICES WHEN THE AMBIENT TEMPERATURE INCREASES

Shelekhova O.G.

A simplified method for assessing reliability indicators at the design stage and during the operation of radio engineering devices has been developed.

Keywords: reliability, reliability algorithm, probability of failure-free operation, radio engineering devices.

Шелехова Ольга Георгиевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: jenjaistorik@mail.ru

Shelekhova Olga Georgievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИРКУЛЯТОРА ДЛЯ ПОЛНОДУПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ PLC

© 2025 Мовчан А., Савенко К.В., Рогожников Е.В., Коновальчиков А., Бокушин А.С.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований макета электронного циркулятора, предназначенного для применения в полнодуплексных системах передачи данных по цепям питания. Эффективность устройства оценивалась по уровню подавления сигнала собственного передатчика на приёмном порту. При работе на согласованную нагрузку уровень подавления составил 45 дБ. В реальной сети средний уровень подавления варьировался от 8,7 до 14,6 дБ в зависимости от частоты, причем эффективность устройства росла с её увеличением. Полученные данные подтверждают потенциал использования электронных циркуляторов в PLC-системах и указывают на необходимость решения задачи широкополосного согласования с переменным импедансом сети.

Ключевые слова: электронный циркулятор, полнодуплексная связь, PLC, подавление помех, линии электропередач, OFDM, согласование импеданса.

Введение. Одной из основных задач при разработке систем передачи данных по линиям питания (PLC) является увеличение скорости передачи данных, что осложняется неблагоприятными характеристиками канала, включая высокий уровень помех и нестабильную передаточную функцию канала [1]. Традиционные подходы, основанные на частотном или временном разделении каналов, ограничивают пропускную способность и снижают эффективность использования спектра. Перспективным решением данной проблемы является применение дуплексных схем, в которых используются электронные циркуляторы для обеспечения эффективной развязки, передающего и приёмного трактов в одном частотном диапазоне. Однако эффективность таких устройств напрямую зависит от характеристик нагрузки, в качестве которой в PLC-системах выступает электрическая сеть [2].

За последние годы технология полнодуплексной передачи данных активно изучалась в контексте систем связи по линиям электропередач. Были предложены различные архитектурные решения для реализации полнодуплексных систем, включая аналоговые и цифровые методы подавления собственных помех. В работах [3-5] исследованы возможности применения однополосной полнодуплексной связи (In-Band Full-Duplex, IBFD) для увеличения пропускной способности и спектральной эффективности PLC-систем. В [6-8] предложены различные технические реализации полнодуплексных модемов.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований макета электронного циркулятора, предназначенного для применения в полнодуплексных PLC-системах. Исследования проведены в двух режимах: при работе на согласованную нагрузку и при подключении к реальной электрической сети. Оценка эффективности устройства выполнена по уровню подавления сигнала собственного передатчика (сигнал-помеха) на приёмном порту. Полученные данные позволяют оценить практическую применимость подобных решений в условиях реальных сетей электропитания.

Экспериментальное исследование электронного циркулятора при работе на согласованную нагрузку. Для проведения экспериментальных исследований полнодуплексных PLC систем связи был разработан и изготовлен макет электронного циркулятора, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 1.

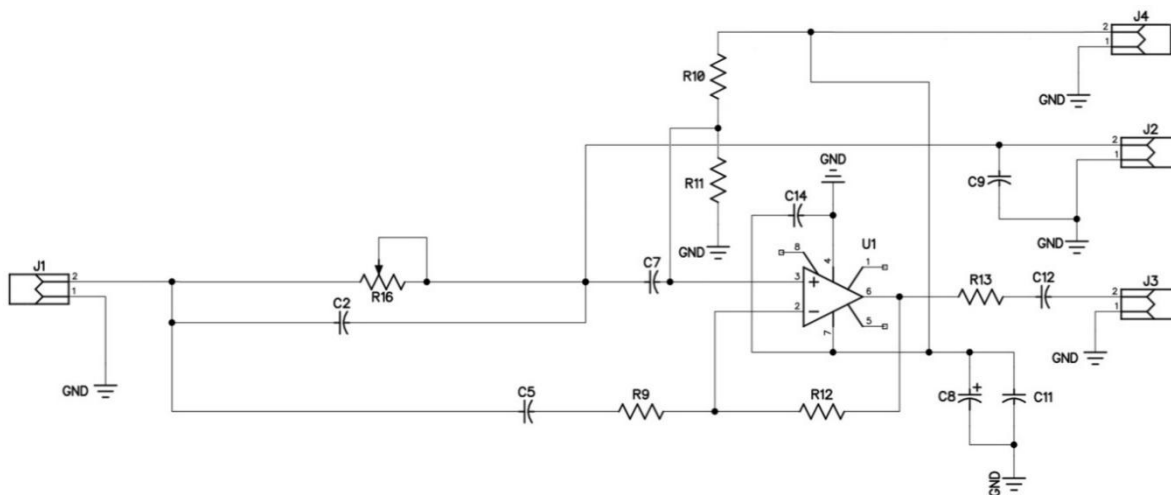


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная электронного циркулятора

Макет электронного циркулятора имеет три сигнальных порта: первый порт J1 вход TX для сигнала передатчика; порт J2 для подключения к линии связи СН; порт J3 выход RX для подключения приемной части.

Схема разработанного макета электронного циркулятора представляет собой дифференциальный усилитель, который реализован на микросхеме U1 операционного усилителя LMH6723 и элементах цепей обратной связи. Перестраиваемое сопротивление R16 подключено к входу J1 циркулятора с одной стороны и с другой стороны к выходу циркулятора J2. Перестраиваемое сопротивление предназначено для настройки циркулятора и достижения требуемого уровня подавления сигнала-помехи.

Для проведения экспериментального исследования макета электронного циркулятора был создан испытательный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 2.

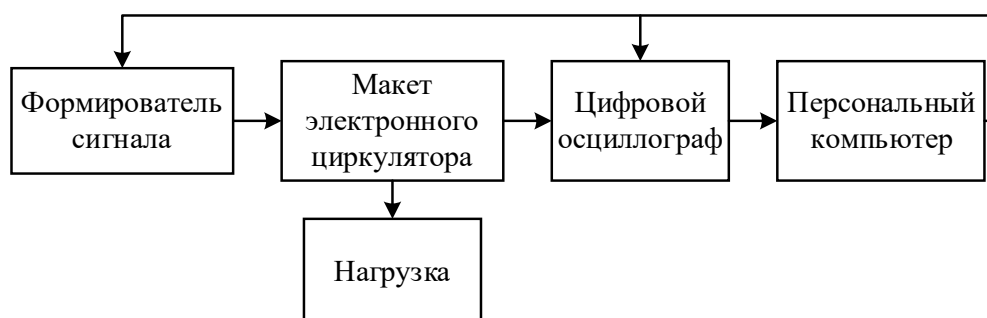


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная электронного циркулятора

Экспериментальный стенд является автоматизированным и управляется с персонального компьютера из среды MatLab. Стенд осуществляет формирование отчетов широкополосного сигнала, загрузку их в генератор, сбор данных цифровым осциллографом и обработку полученных отсчетов сигнала для оценки результатов работы электронного циркулятора.

В качестве формирователя физического сигнала использовался генератор Keysight 33500B. Формирование сигнала осуществлялось в среде MatLab. Полученный массив данных загружался в генератор. При этом генерирование происходило путем циклического повтора записанного сигнала. Для обработки сигнала, полученного с выхода циркулятора, использовался осциллограф Agilent DSO-X-2002A и персональный компьютер с программной средой MatLab.

Для проведения экспериментального исследования был сформирован опорный широкополосный сигнал с модуляцией OFDM (OFDM – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). Опорный OFDM сигнал имел 256 поднесущих, из которых по 25 поднесущих предназначены для правого и левого частотных защитных интервалов. Ширина полосы сформированного сигнала выбрана, равной 10 МГц, с несущей частотой, равной 10 МГц.

Сформированный генератором сигнал передатчика подавался на порт J1 входа TX макета циркулятора. Сформированный и прошедший циркулятор сигнал, предназначенный для линии связи, выходил с порта J2(SH) макета циркулятора. К нему была подключена активная нагрузка с сопротивлением 50 Ом. Прошедший циркулятор и подавленный сигнал передатчика (сигнал-помеха) выходил с порта J3 (RX) макета циркулятора.

На рис. 3 представлен совместный график спектральной плотности входного (а) сигнала и выходного сигнала-помехи после подавления (б).

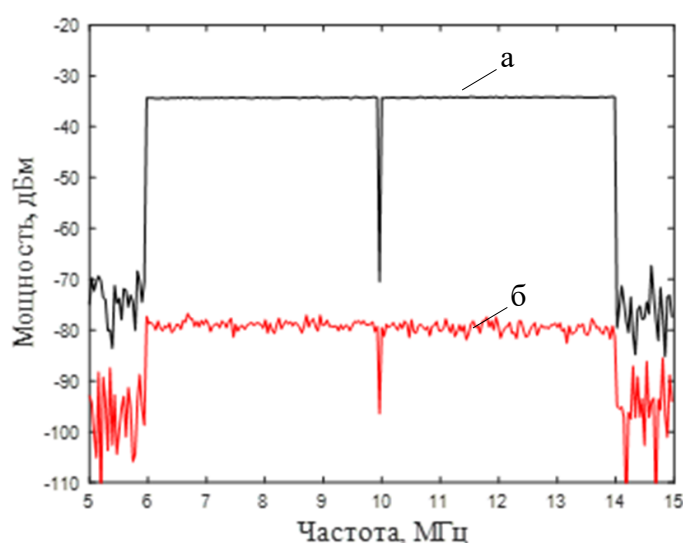


Рис. 3. Спектральная плотность входного (а) и выходного в приемник (б) сигналов циркулятора

Исходя из полученных данных следует, что уровень подавления сигнала-помехи в экспериментальном исследовании с макетом электронного циркулятора при работе на согласованную нагрузку составил 45 дБ во всей исследуемой полосе частот.

Экспериментальное исследование электронного циркулятора при работе на несогласованное сопротивление электрической сети. Для проведения экспериментального исследования макета электронного циркулятора при работе на несогласованное сопротивление электрической сети выходной порт циркулятора был подключен через цепь развязки к реальной электрической сети. В качестве устройства развязки используется развязывающая цепь измерителя импеданса сети, описанного в [9]. Далее был сформирован широкополосный сигнал с модуляцией OFDM с шириной полосы, равной 10 МГц, и несущей частотой, равной 10 МГц.

Сформированный генератором сигнал передатчика подается на порт J1 входа ТХ макета циркулятора. С выхода порта J2, подключенного к сети через цепь развязки, сигнал поступает в электрическую сеть, с этого порта производится запись и измерение мощности сигнала, поступающего в сеть. С порта J3 производится запись и измерение остаточного сигнала-помехи. Далее записанные сигналы подвергаются обработке, при которой выполняется временная синхронизация и выделение каждого OFDM символа с последующим измерением мощности. Коэффициент подавления сигнала помехи здесь рассчитывается, как разница мощностей сигнала, поступающего в канал связи, и сигнала, поступающего с выхода циркулятора в приемную часть.

На рис. 4 представлен совместный график спектральной мощности выходного сигнала циркулятора, поступающего в сеть (а), и выходного сигнала помехи после подавления, поступающего в приемную часть (б).

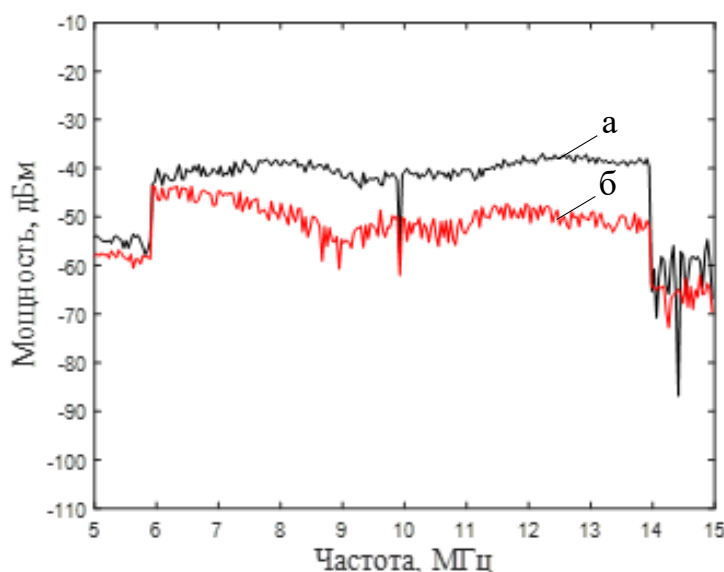


Рис. 4. Спектральная плотность входного (а) и выходного (б) сигналов циркулятора с несущей частотой 10 МГц

Реальные измерения показывают частотную зависимость входного импеданса электрической сети, как описано в [10]. Это обуславливает неравномерность коэффициента подавления в зависимости от частоты, как видно на рис. 4. Также из-за постоянно изменяющегося состояния канала связи, обусловленного нестабильностью импеданса и помехами в электрической сети, полученные результаты демонстрируют значительный разброс при каждом повторном измерении. Вследствие этого для оценки стабильности работы макета циркулятора и эффективности подавления помехи на рис. 5 приводится график изменения среднего значения коэффициента подавления сигнала в зависимости от номера измеренного OFDM-символа в выборке. Данный подход позволяет проследить динамику подавления во времени и оценить устойчивость работы устройства в реальных условиях эксплуатации.

Для определения значений коэффициента подавления сигнала-помехи в большем диапазоне (от 40 кГц до 20 МГц) были проведены дополнительные измерения, в которых были сформированы сигналы с несущей частотой 5 МГц и 15 МГц. Запись сигнала осциллографом производилась выборкой, содержащей 17 OFDM символов, следующих друг за другом, что дает возможность анализировать изменение коэффициента подавления во времени.

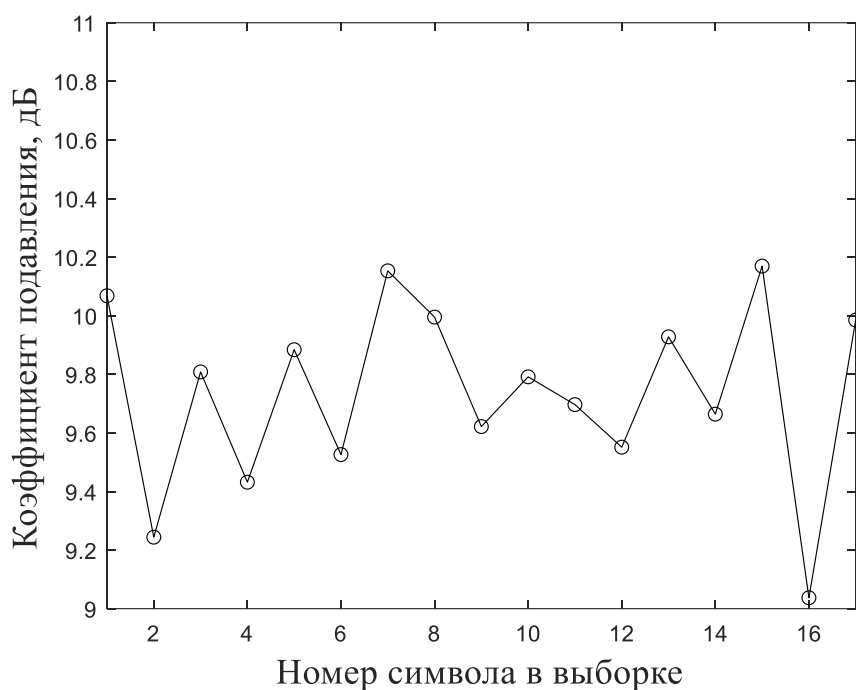


Рис. 5. График зависимости коэффициента подавления от номера измеренного OFDM-символа в выборке для сигналов с несущей частотой 10 МГц

На рис. 6 представлен совместный график спектральной плотности выходного сигнала циркулятора, поступающего в сеть (а), и выходного сигнала помехи после подавления (б). Сигнал имеет несущую частоту 15 МГц.

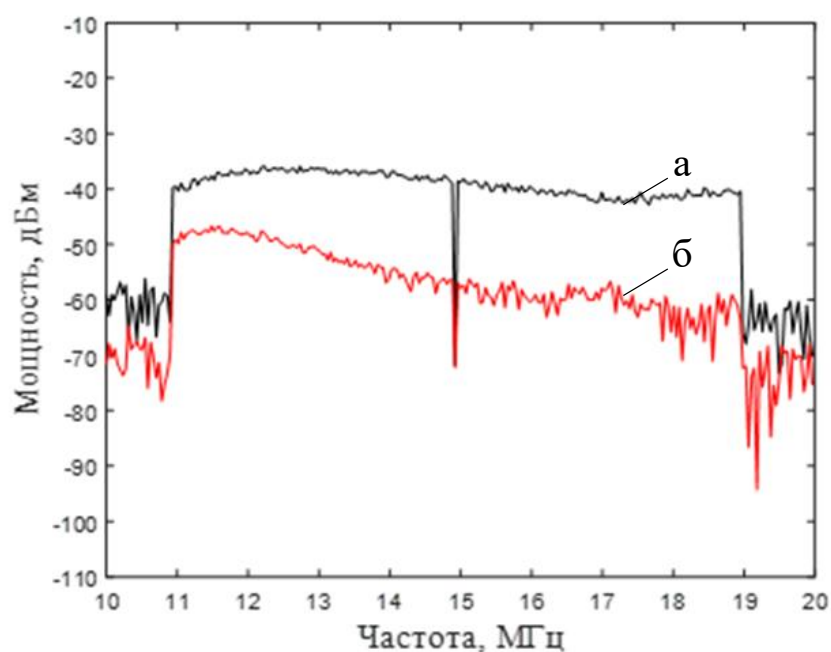


Рис. 6. Спектральная плотность входного (а) и выходного (б) сигналов циркулятора с несущей частотой 15 МГц

На рис. 7 представлен график зависимости коэффициента подавления от номера символа в выборке.

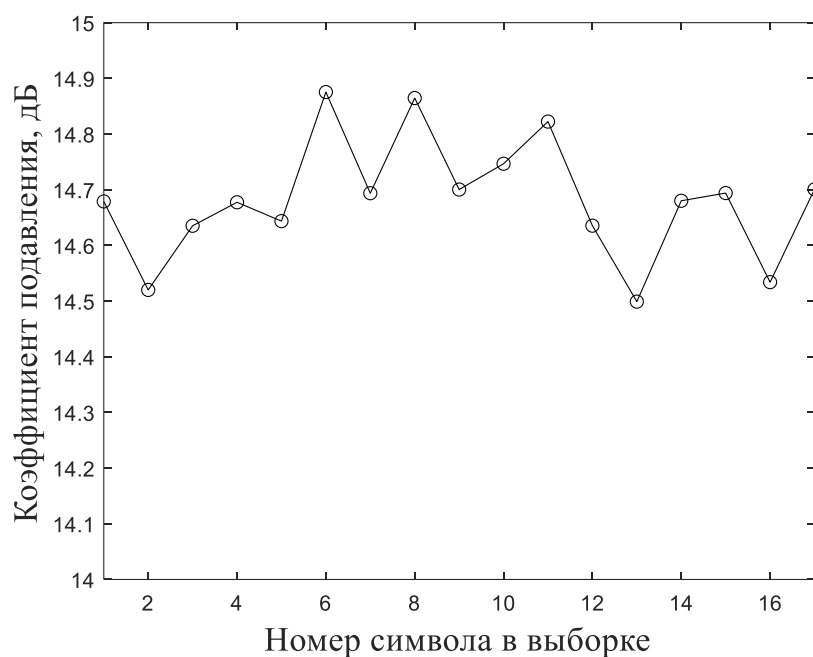


Рис. 7. График зависимости коэффициента подавления от номера символа в выборке для сигналов с несущей частотой 15 МГц

На рис. 8 представлен совместный график спектральной плотности выходного сигнала циркулятора, поступающего в сеть (а), и выходного сигнала помехи после подавления, поступающего в приемную часть (б).

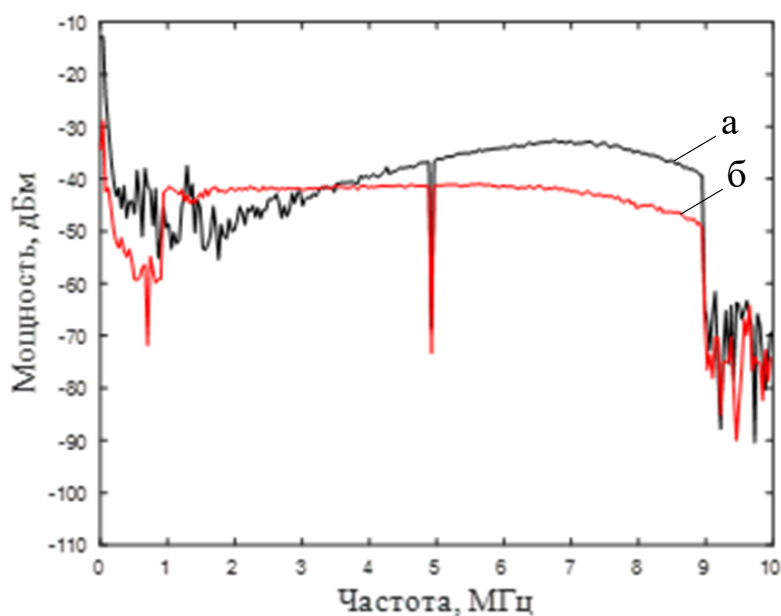


Рис. 8. Спектральная плотность входного (а) и выходного (б) сигналов циркулятора с несущей частотой 5 МГц

На рис. 9 представлен график зависимости коэффициента подавления от номера символа в выборке.

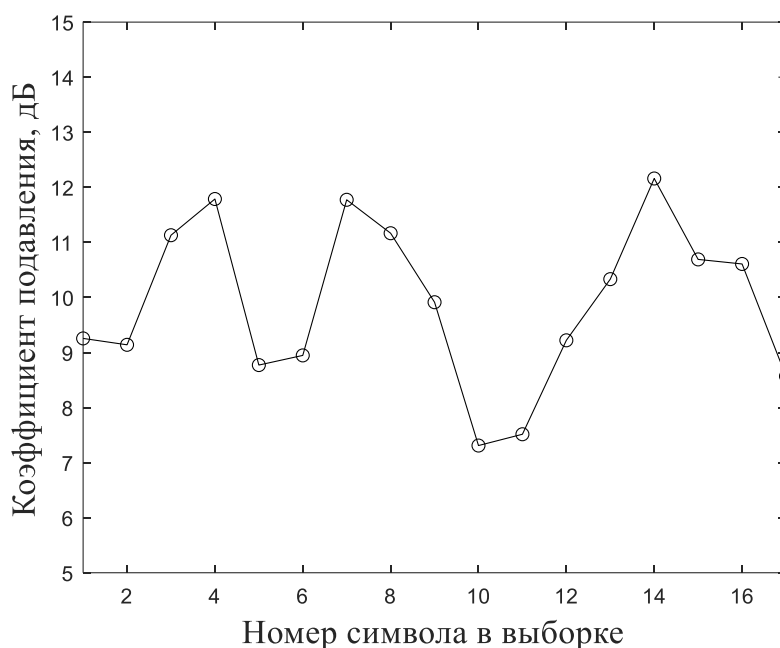


Рис. 9. График зависимости коэффициента подавления от номера символа в выборке для сигналов с несущей частотой 5 МГц

Далее представлена таблица 1, содержащая средние значения коэффициентов подавления и их среднеквадратических отклонений для трех участков частотного диапазона от 40 кГц до 20 МГц.

Таблица 1. Коэффициент подавления сигнала помехи в трех участках частотного диапазона

Несущая частота, МГц	Среднее значение коэффициента подавления, дБ	СКО коэффициента подавления, дБ
5	8,7	1,5
10	9,7	0,3
15	14,6	0,1

Из выше представленных результатов эксперимента по оценке подавления сигнала-помехи в трех участках частотного диапазона следует: коэффициент подавления увеличивается по ходу частотного диапазона, а его нестабильность уменьшается; преимущественно в низкочастотном диапазоне большое влияние на измерение мощностей сигналов циркулятора оказывают сетевые помехи, что отражается на оценке коэффициента подавления.

Выводы. Экспериментальные исследования макета электронного циркулятора в режиме работы на согласованную активную нагрузку сопротивлением 50 Ом показали, что уровень подавления сигнала помехи на приёмном порту достигает 45 дБ для широкополосного сигнала с полосой 10 МГц. Это свидетельствует о высокой эффективности устройства при благоприятных условиях согласования импедансов. Однако при подключении к реальной электрической сети, характеризующейся несогласованным входным сопротивлением, эффективность устройства снижается. В диапазоне частот от 5 до 15 МГц средний уровень подавления составил 9,7 дБ. Также было произведено измерение коэффициента подавления сигнала помехи и его нестабильности для сигнала с полосой 10 МГц в интервале от 40 кГц до 20 МГц.

Из результатов эксперимента следует, что коэффициент подавления увеличивается по ходу частотного диапазона от 8 дБ до 15 дБ, а его нестабильность уменьшается. В свою очередь в низкочастотном диапазоне большое влияние на измерение мощностей сигналов с циркулятора оказывают сетевые помехи, что отражается на оценке коэффициента подавления. Таким образом, разработанный электронный циркулятор демонстрирует потенциал для применения в полнодуплексных PLC-системах, особенно в частотных диапазонах выше 10 МГц. Дальнейшая работа должна быть направлена на решение задачи широкополосного согласования выходного сопротивления электронного циркулятора с входным импедансом электрической сети, а также на интеграцию устройства в состав полноценной системы передачи данных для обеспечения устойчивой связи в динамически изменяющейся среде электрической сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Passerini, F. Analysis of high-frequency impedance measurement techniques for power line network sensing / F. Passerini, A. M. Tonello // IEEE Sensors Journal. – 2017. – Vol. 17. – No. 23. – P. 7630-7640. – DOI 10.1109/JSEN.2017.2732737.
2. Электронный циркулятор в полнодуплексной системе связи по цепям питания / А. К. Мовчан, Е. В. Ломаков, Е. В. Рогожников [и др.] // Advances in Science and Technology: материалы LXIII международной научно-практической конференции, 15 сентября 2024 г., Москва / Научно-издательский центр Актуальность.РФ. – Москва, 2024. – С. 42–44.
3. Canete, F. J. PLC networks with in-band full-duplex relays / F. J. Canete, G. Prasad, L. Lampe // 2020 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC) / IEEE. – 2020. – P. 1–6. – DOI 10.1109/ISPLC48789.2020.9115410.
4. Prasad, G. Enhancing transmission efficiency of broadband PLC systems with in-band full duplexing / G. Prasad, L. Lampe, S. Shekhar // 2016 International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC) / IEEE. – 2016. – P. 46–51. – DOI 10.1109/ISPLC.2016.7476258.
5. Prasad, G. Digitally controlled analog cancellation for full duplex broadband power line communications / G. Prasad, L. Lampe, S. Shekhar // IEEE Transactions on Communications. – 2017. – Vol. 65. – No. 10. – P. 4419–4432. – DOI 10.1109/TCOMM.2017.2717831.
6. Prasad, G. In-band full duplex broadband power line communications / G. Prasad, L. Lampe, S. Shekhar // IEEE Transactions on Communications. – 2016. – Vol. 64. – No. 9. – P. 3915–3931. – DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2587284.
7. Passerini, F. Adaptive hybrid circuit for enhanced echo cancellation in full duplex PLC / F. Passerini, A. M. Tonello // 2018 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC) / IEEE. – 2018. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ISPLC.2018.8360238.
8. Passerini, F. Analog full-duplex amplify-and-forward relay for power line communication networks / F. Passerini, A. M. Tonello // IEEE Communications Letters. – 2019. – Vol. 23. – No. 4. – P. 676–679. – DOI: 10.1109/LCOMM.2019.2901480.
9. Мовчан, А. К. Схемотехника приемно-передающих трактов широкополосных PLC-систем связи / А. К. Мовчан, Э. М. Дмитриев, Е. В. Рогожников // Электронные средства и системы управления : материалы XIV Международной научно-практической конференции, 28–30 ноября 2018 г., Томск : в 2 ч. Часть 2 / В-Спектр, ТУСУР. – Томск, 2018. – С. 259–298.
10. Измерение высокочастотного импеданса электрической сети переменного тока / Е. В. Ломаков, Е. В. Рогожников, А. С. Бокушин, Н. Г. Калашникова // Электронные средства и системы управления : материалы XX Международной научно-практической конференции, 20–22 ноября 2024 г., Томск : в 2 ч. Часть 1 / В-Спектр, ТУСУР. – Томск, 2024. – С. 18–21.

Поступила в редакцию 16.09.2025 г., рекомендована к печати 15.10.2025 г.

STUDY OF AN ELECTRONIC CIRCULATOR FOR FULL-DUPLEX PLC SYSTEMS

Movchan A., Savenko K.V., Rogozhnikov E.V., Konovalchikov A., Bokushin A.S.

This paper presents the results of experimental studies of an electronic circulator prototype designed for use in full-duplex power line communication (PLC) systems. The device's performance was evaluated based on the level of transmitter signal suppression at the receive port. When operating on a matched load, the suppression level reached 45 dB. In a real network, the average suppression level varied from 8.7 dB to 14.6 dB depending on the frequency, with the device's effectiveness increasing at higher frequencies. The obtained data confirm the potential of using electronic circulators in PLC systems and highlight the need to address the challenge of broadband impedance matching with the network's variable impedance.

Keywords: electronic circulator, full-duplex communication, PLC, noise suppression, power lines, OFDM, impedance matching.

Мовчан Андрей

кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
Российская Федерация, г. Томск.
E-mail: andrei.movchan@tusur.ru

Movchan Andrei

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Television and Control of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russian Federation, Tomsk.

Савенко Кирилл Валерьевич

инженер кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
Российская Федерация, г. Томск.
E-mail: kirill.savenko@tusur.ru

Savenko Kirill Valerevich

Engineer of the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering Russian of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russian Federation, Tomsk.

Рогожников Евгений Васильевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
Российская Федерация, г. Томск.
E-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru

Rogozhnikov Evgenii Vasilevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russian Federation, Tomsk.

Коновальчиков Артём

ассистент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
Российская Федерация, г. Томск.
E-mail: artem.konovalchikov@tusur.ru

Konovalchikov Artem

Assistant of the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russian Federation, Tomsk.

Бокушин Александр Сергеевич

лаборант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
Российская Федерация, г. Томск.
E-mail: aleksandr.s.bokushin@tusur.ru

Bokushin Aleksandr Sergeevich

Laboratory assistant of the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russian Federation, Tomsk.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN CDWOXG
УДК 621.396.96

DOI 10.5281/zenodo.18229754

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ НАЗЕМНОГО ПРИБОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО ГИРОСКОПА

© 2025 *Наумов М.А., Волуева О.С.*

В статье представлены результаты экспериментальных исследований точности определения ориентации наземного прибора (НПО) с использованием динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ) и акселерометров. Основное внимание уделено оценке эффективности подавления влияния дефектов датчиков угловой скорости (ДУС) на точность измерения углов ориентации. Разработаны и проверены алгоритмы вычисления углов Эйлера-Крылова, обеспечивающие точность до 1 угловой минуты для углов наклона и до 20 угловых минут для азимута. Установлено, что основной причиной погрешности является нестабильность скорости вращения платформы. Показано, что снижение нестабильности до 1% позволяет уменьшить погрешность до 1–2 угловых минут. Результаты могут быть использованы при проектировании высокоточных навигационных систем.

Ключевые слова: гироскоп, датчик, угловая скорость, акселерометр, ориентация, навигация, алгоритмы, погрешность.

Введение. Автономное определение ориентации в пространстве при недоступности спутниковых сигналов является критически важной задачей для современных навигационных комплексов. В этом контексте особый интерес представляют наземные приборы ориентации (НПО), основу которых составляют динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) и акселерометры. Однако эксплуатационная точность таких систем нивелируется наличием инструментальных погрешностей датчиков угловой скорости (ДУС), включая фазовые сдвиги и шумовые компоненты, а также несовершенством кинематики платформы [1].

Научный интерес данного исследования сфокусирован на двух ключевых аспектах:

–Количественный анализ эффективности методов подавления деструктивного влияния дефектов ДУС на точность измерений. В частности, определяется достижимая точность оценки угла, формируемого проекцией вектора угловой скорости Земли на экваториальную плоскость НПО, в условиях, когда ось вращения его платформы занимает вертикальное положение.

–Практическая апробация алгоритмического обеспечения, предназначенного для вычисления углов ориентации прибора в произвольно ориентированной по азимуту системе координат, с последующей оценкой погрешности данных измерений.

Краткое описание экспериментальной установки. Для проведения экспериментальных исследований НПО была создана установка (рис. 1). В состав установки входят: действующий макет НПО (без системы взаимного оптического визирования и дальномера) (рис. 2); стенд наклонно-поворотный КПА-5; двухкоординатная оптическая делительная головка ОДГ-10; наземный гироскоп; два цифровых вольтметра; осциллограф; компьютер; электронно-счётный частотомер; обслуживающая электроника; два испытательных стола.



Рис. 1. Действующая установка



Рис. 2. Действующий макет НПО

На рис. 1 показан макет НПО, установленный на наклонно-поворотном стенде КПА-5. Калибровка акселерометров и ДУС макета НПО, а также эксперименты по определению эффективности подавления влияния погрешностей измерений ДУС на точность НПО, а также по определению достижимой точности определения азимутального угла проводились при установке макета НПО на двухкоординатную оптическую делительную головку.

Схема установки представлена на рис. 3. На рис. 3 обозначено:

ДНГ – динамически настраиваемый гироскоп; П – платформа;

ДУ (Энк) – датчик угла (энкодер);

ДГ – двигатель-генератор с понижающим редуктором;

ОХУZ – система координат, связанная с корпусом прибора;

ОХ_ПУ_ПZ_П – система координат, связанная с платформой;

ε – угол поворота платформы относительно корпуса прибора;

А_х, А_у – акселерометры, оси чувствительности которых параллельны осям ОХ и ОУ соответственно;

УПА_х, УПА_у – усилители-преобразователи акселерометров А_х и А_у соответственно;

ПТНА_х, ПТНА_у – преобразователи «ток – напряжение» акселерометров А_х и А_у соответственно;

УПДУС_х, УПДУС_у – усилители-преобразователи датчиков угловой скорости вращения платформы вокруг осей О_х и О_у соответственно;

ПТНД_x, ПТНД_y – преобразователи «ток – напряжение» датчиков угловой скорости вращения платформы вокруг осей O_x и O_y соответственно;

СТС – система термостатирования ДНГ;

СУИП – система управления интегрирующим приводом;

К – компаратор;

ОВ – одновибратор;

СФКУ – схема формирования кода угла;

ЭСЧ – электронно-счётный частотомер;

ЦВ_x, ЦВ_y – цифровые вольтметры;

ОСЦ – осциллограф;

SA₁, SA₂ – переключатели;

ГН – генератор напряжений;

ИП1, ИП2, ИП3, ИП4 – источники питания.

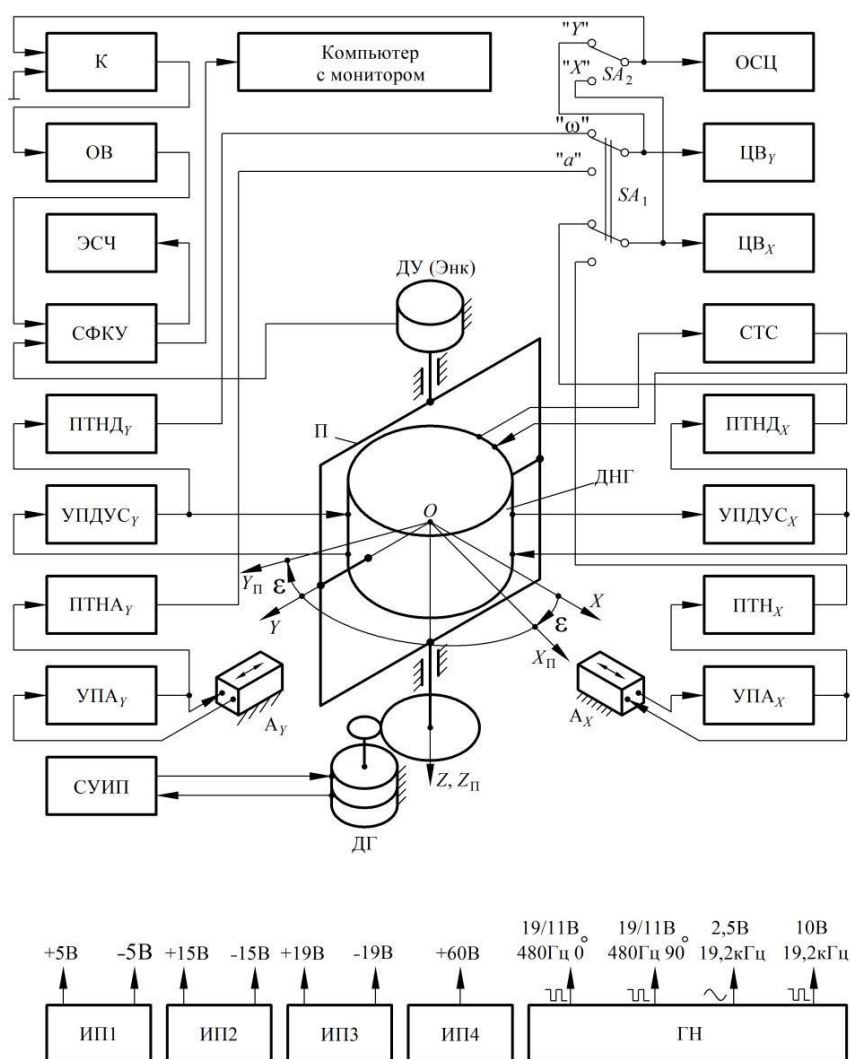


Рис. 3. Схема установки

Акселерометры A_x и A_y – компенсационные, построенные на основе датчика акселерометра маятникового типа ДА-11 [2, 3]. В нём маятник подвешен на камневых опорах. В приборе применены датчик угла трансформаторного типа и датчик момента магнитоэлектрического типа.

Динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) – гиродатчик типа ГВК-6 [4, 5]. Имеет внутренний двухколечный карданов подвес ротора, синхронно-гистерезисный привод ротора, индуктивные датчики угла и магнитоэлектрические датчики момента по каждой из двух измерительных осей, совпадающих с осями OX_P и OY_P . Гиродатчик обеспечивает заявленные разработчиком точностные характеристики в условиях термостатирования прибора.

Конструкция платформы (П) служит для монтажа динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ) и приведения его во вращение вокруг оси OZ по отношению к корпусу устройства. Подвес аппарата реализован на основе шарикоподшипниковых опор. Кинематическая цепь вдоль оси подвеса включает: в верхней части прибора – высокоточный преобразователь «угол-код» (энкодер); в нижней – узел токоподводов (на схеме отсутствует) и двигатель-генератор, оснащенный понижающим редуктором.

Функцию измерения углового положения выполняет датчик угла (ДУ), представляющий собой прецизионный энкодер, транслирующий угол поворота платформы в цифровой код. Модель прибора – инкрементальный преобразователь ЛИР 190Е [3]. Для соединения полуоси подвеса с валом датчика применена сильфонная муфта, обеспечивающая компенсацию возможных перекосов.

В составе интегрирующего привода используется двигатель-генератор (ДГ) с понижающим редуктором, который гарантирует плавное вращение платформы. Данный узел отвечает за поддержание строго заданной скорости и направления вращения, обеспечивая тем самым высокую стабильность работы системы.

К числу электронных устройств, обеспечивающих работу НПО относятся: УПАХ, ПТНАХ, УПАУ, ПТНАУ, УПДУСХ, ПТНДХ, УПДУСУ, ПТНДУ, СТС, а также СФКУ, СУИД.

УПАХ, УПАУ – устройства, преобразующие амплитудно-модулированный сигнал переменного тока с датчиков угла акселерометров в постоянный ток, подаваемый в обмотки датчиков момента этих акселерометров. Эти токи с помощью ПТНАХ, ПТНАУ преобразуются в пропорциональные им напряжения, которые сглаживаются с помощью фильтров низких частот и подаются для последующей обработки.

УПДУСХ, ПТНДХ, УПДУСУ, ПТНДУ – устройства, выполняющие те же, описанные выше, функции, но для двухкомпонентного ДУС на основе ДНГ и отличающиеся от последних только параметрами. В экспериментах использован один канал измерения скорости – канал «У».

СТС предназначена для осуществления термостатирования ДНГ на уровне $+(75 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

СФКУ решает задачу непрерывной обработки данных с ДУ, отображая в реальном времени текущий угол ε на компьютерном мониторе. Кроме того, по импульсу, поступающему от одновибратора ОВ, система фиксирует и выводит значение угла ε , актуальное на момент, заданный передним фронтом этого импульса.

Компаратор К вырабатывает импульс, момент начала которого совпадает с переходом выходного сигнала ДУС через ноль.

Для исключения «дребезга», возникающего из-за помех в сигнале ДУС, в схеме используется одновибратор ОВ.

СУИД формирует управляющие воздействия на ДГ, поддерживая строго линейную зависимость скорости вращения его вала от входного управляющего сигнала. напряжению. В макете реализован интегрирующий привод переменного тока.

Технические характеристики установки:

Коэффициенты передачи датчиков линейных ускорений, $B \cdot c^2 / m - 0.5$.

Коэффициенты передачи датчика угловой скорости, $B \cdot час / град (B \cdot c / рад) - 0.25 (3.98 \cdot 10^{-3})$.

Постоянная времени сглаживающих фильтров (второго порядка) на выходах датчиков акселерометров, $c - 0.3$.

Постоянная времени сглаживающих фильтров (второго порядка) на выходах датчика угловой скорости при выполнении окончательных экспериментов, $c - 10$.

Диапазон обеспечиваемых скоростей вращения платформы (в двух направлениях), $град / c (рад / c) - от 1 до 20 (от 0.01745 до 0.349)$.

Погрешность преобразования угла поворота платформы в цифровой код, $угл. сек, не более - 5$.

Цена младшего разряда устройства визуализации величины угла поворота платформы, $угл. сек - 1$.

Время выхода на режим системы термостатирования гиродатчика при температуре окружающей среды $+20^{\circ}C$, $мин., не более - 7$.

Погрешность измерения напряжений на выходах датчиков линейных ускорений и датчиков угловой скорости, $\%, не более - \pm(0.025+0.05/U_x)$,

где U_x – показание вольтметра, B .

Относительная погрешность определения скорости вращения платформы (среднее значение за 1 с), $\% - 0.143$.

Питание установки: от однофазной промышленной сети напряжением $220 \pm 22 B$ частотой $50 \pm 0,5 Гц$; от однофазной сети напряжением $36 \pm 1.8 B$ частотой $400_{-4}^{+0} Гц$.

Погрешность задания азимутального угла корпуса прибора при установке его на оптическую делительную головку, $угл. сек, не более - \pm(10 \pm \delta_{ГК})$,

где $\delta_{ГК}$ – предельная погрешность определения азимута наземным гироскопическим компасом 1Г17, $угл. сек$.

Погрешность задания углов Θ и Φ корпуса прибора, установленного на наклонно-поворотном стенде КПА-5, $угл. мин, не более - \pm(6 \pm \delta_{КО})$,

где $\delta_{КО}$ – предельная допустимая погрешность оптического квадранта КО-30М.

Погрешность задания угла Ψ корпуса прибора, установленного на наклонно-поворотном стенде КПА-5, $угл. мин, не более - \pm(3 \pm \delta_{ГК})$.

Методика проведения экспериментов. В экспериментальных исследованиях можно выделить три этапа. Первоначальный этап исследований включает процедуру калибровки акселерометрических датчиков и двухкомпонентного датчика угловой скорости (ДУС). С этой целью прибор ориентации (НПО) фиксируется на двухкоординатной оптической делительной головке типа ОДГ-10. Позиционирование выполняется таким образом, чтобы ось OZ связанной с корпусом прибора системы координат была соосна со шпинделем делительной головки (рис. 4). Сама головка монтируется на первом испытательном столе с обеспечением строго вертикального положения своей оси, что контролируется с помощью оптического квадранта.

Первоначальная ориентация осей связанной с платформой системы координат (осей чувствительности ДУС) в азимутальной плоскости задаётся с применением наземного гироскопического компаса 1Г17, оснащённого автоколлимационной зрительной трубой, и прецизионного зеркала, установленного на платформе макета НПО. С помощью гироскопического компаса определяется азимут нормали к плоскости зеркала, которая совпадает с направлением оси ОУП. Базовый блок гироскопического компаса в процессе юстировки монтируется на втором испытательном столе.



Рис. 4. Макет НПО на двухкоординатной оптической делительной головке ОДГ-10

Конструкция испытательных столов представляет собой массивные стальные плиты, жёстко зафиксированные на консольных кронштейнах. Данные опорные конструкции забетонированы в несущую стену специализированного здания, изолированного от воздействия вибраций, вызванных движением транспорта и работой промышленного оборудования.

В процессе тарировки акселерометров оси их чувствительности последовательно ориентируются в горизонтальную плоскость (для компенсации смещения нулевой точки), а затем приводятся в строго вертикальное положение (для калибровки номинальной крутизны преобразования). Для реализации данной процедуры ось шпинделя оптической делительной головки переводится в горизонтальное положение. Достижение заданной крутизны обеспечивается подбором номиналов резисторов в преобразователях «ток – напряжение» акселерометров (ПТНА_x и ПТНА_y).

При калибровке каналов измерения ДУС ось чувствительности калибруемого канала переводится в горизонтальное положение и ориентируется в направлении Восток – Запад. В таком положении подбором номиналов резисторов в схемах компенсации усилителей-преобразователей УПДУС_x, УПДУС_y устраняется смещение нулей. После этого разворотом в азимуте на 90° ось чувствительности переводится в плоскость географического меридиана. В таком положении путём подбора номиналов резисторов в схемах ПТНД_x, ПТНД_y обеспечивается требуемая крутизна характеристики каналов ДУС. Последняя определяется как отношение выходного напряжения калибруемого канала к величине горизонтальной проекции угловой скорости вращения Земли – $\Omega_3 \cdot \cos \varphi_0$; Ω_3 – величина угловой скорости вращения Земли (15,041 град/час); φ_0 – широта места.

На второй стадии экспериментальных исследований ось OZ макета наземного прибора ориентации (НПО) устанавливается в вертикальную позицию. В процессе испытаний платформа приводится во вращение с постоянной малой угловой скоростью в заданном направлении. В течение временного интервала, соответствующего n полным оборотам платформы, регистрируются отсчёты угла ε с учётом полярности производной выходного сигнала датчика угловой скорости (ДУС).

На следующем шаге эксперимента кинематика платформы инвертируется — направление вращения изменяется на противоположное при сохранении идентичной величины угловой скорости. В указанном режиме выполняются измерения аналогичного набора параметров.

Серия экспериментов повторяется при различных значениях фазовых сдвигов, искусственно вносимых в работу ДУС, а также при разноуровневых шумовых воздействиях на его выходной сигнал. Дополнительным варьируемым параметром выступает величина угловой скорости вращения платформы.

На третьем этапе проверяются разработанные алгоритмы вычисления углов Эйлера-Крылова Ψ , Θ и Φ , характеризующих ориентацию макета НПО при его различных положениях в азимуте и относительно вертикали. При этом значения углов Θ и Φ берутся в пределах $\pm (15 - 20)$ градусов.

Макет НПО закрепляется на поворотном столе (стенде) КПА-5 (рис. 5), способном воспроизводить углы Эйлера-Крылова в диапазонах: Ψ – от 0 до 360° ; Θ – от -40 до $+40^\circ$; Φ – от -50 до $+50^\circ$. Нониусные отсчётные устройства обеспечивают погрешность отсчётов углов Θ и Φ – не более ± 6 угловых минут, угла Ψ – не более ± 3 угловых минуты.

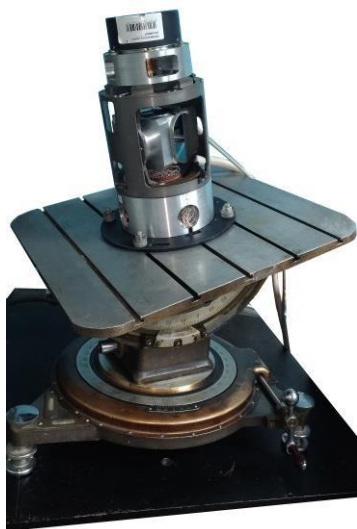


Рис. 5. Макет НПО на наклонно-поворотном стенде КПА-5

Монтаж испытательного стенда осуществляется на первом опорном столе. При этом базовый блок гирокомпаса сохраняет своё положение на втором столе, где он был установлен ранее.

Ориентация осей координат стенда относительно географически ориентированной горизонтальной системы выполняется с применением ранее задействованного измерительного оборудования — оптического квадранта и наземного гироскопического компаса.

Эксперименты по проверке разработанных алгоритмов вычислений углов Ψ , Θ и Φ (третий этап) выполняются следующим образом.

Платформа стенда приводится в положение, характеризующее выбранными значениями трёх углов: Ψ , Θ , Φ . Переключатель SA1 переводится в положения «а» и с цифровых вольтметров ЦВ_x, ЦВ_y считываются напряжения U_{ax} и U_{ay} , характеризующие кажущие линейные ускорения a_x и a_y . Величины ускорений вычисляются по формулам [6]:

$$a_x = \frac{U_{a_x}}{K_a};$$

$$a_y = \frac{U_{a_y}}{K_a},$$

где K_a – крутизна характеристики акселерометров.

Переключатель SA1 переводится в положение «ω». Включается вращение платформы сначала в одну сторону, затем в другую и по методике, использованной на втором этапе исследований, определяется значение угла ε_N .

По результатам сравнения полученных значений углов Ψ , Θ , Φ с заданными значениями этих углов делается вывод о достоверности разработанных алгоритмов.

Настройка масштабных коэффициентов акселерометров и ДУС. Ось вращения шпинделя двухкоординатной оптической делительной головки была точно выверена и установлена в строго вертикальной ориентации. Для контроля точности позиционирования использовался оптический квадрант модели КО-30М, обеспечивающий точность измерений с максимальной погрешностью не более 30 угловых секунд. При данной конфигурации прибора измерительные оси чувствительности акселерометров располагаются строго в горизонтальной плоскости, что обеспечивает корректность проведения калибровочных процедур.

Ось шпинделя делительной головки переводится в горизонтальное положение с погрешностью, не превышающей ± 1 угл. минут. При этом ось чувствительности калибруемого акселерометра приводится в вертикальное положение.

С учётом ускорения силы тяжести в городе Томска, известного с погрешностью не более 10^{-6} м/с² и требуемого значения масштабного коэффициента ($K_a = 0.5\text{В}/(\text{м}/\text{с}^2)$) напряжение на выходе преобразователя «ток – напряжение» калибруемого акселерометра должно быть

$$U = 4.9078, \text{ В.}$$

Масштабный коэффициент акселерометра A_x определяется по формуле [7]:

$$K_{a_x} = F(U_{a_x}, g_x) = \frac{U_{a_x}}{g_x},$$

где U_{a_x} – показание вольтметра; g_x – проекция ускорения сил тяжести на ось чувствительности акселерометра A_x .

Предельная погрешность определения масштабного коэффициента акселерометра A_x определяются по формуле [8]:

$$\Delta K_{a_x} = \left| \left(\frac{\partial F}{\partial U_{a_x}} \right)_{\substack{U_{a_x}=U_{a_0} \\ g_x=g}} \cdot \Delta U_{a_x} \right| + \left| \left(\frac{\partial F}{\partial g_x} \right)_{\substack{U_{a_x}=U_{a_0} \\ g_x=g}} \cdot \Delta g_x \right| = \left| \frac{1}{g} \cdot \Delta U_{a_x} \right| + \left| \frac{U_{a_0}}{g^2} \cdot \Delta g_x \right|. \quad (1)$$

В формулу (1) входят:

- ΔU_{a_x} – погрешность вольтметра, определяемая по формуле [9]:

$$\Delta U_{a_x} = 2.5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta U_{a_0} + 5 \cdot 10^{-4} \cdot U_{II},$$

где U_{II} – предел измерения вольтметра, который в нашем случае равен 10 В;

• Δg_x – погрешность определения значения g_x , включающаяся в себя погрешность из-за неточной выставки оси чувствительности в вертикальное положение и погрешность определения ускорения сил тяжести.

Выставка оси чувствительности акселерометра в заданном положении осуществляется с помощью квадранта и двухкоординатной оптической делительной головки. Поэтому погрешность Δg_x определяется по формуле:

$$\Delta g_x = g \cdot \sin(\delta_{KO} + \delta_{ODT}) + \Delta g,$$

где δ_{KO} – предельная допустимая погрешность оптического квадранта КО-30М, которая равна 30 угл. сек.;

δ_{ODT} – предельная допустимая погрешность двухкоординатной оптической головки, которая равна 1 угл. мин.;

Δg – погрешность определения силы тяжести, которая равна 10^{-4} м/с².

В итоге формула вычисления погрешности определения масштабного коэффициента акселерометра A_x имеет следующий вид:

$$\Delta K_{a_x} = \left| \frac{1}{g} \cdot (2.5 \cdot 10^{-4} \cdot U_{a_0} + 5 \cdot 10^{-4} \cdot U_{II}) \right| + \left| \frac{U_{a_0}}{g^2} \cdot [g \cdot \sin(\delta_{KO} + \delta_{ODT}) + \Delta g] \right|.$$

где g – ускорение сил тяжести места проведения эксперимента (город Донецк).

В результате погрешность определения масштабного коэффициента акселерометра A_x не превысила $8.6 \cdot 10^{-4}$, В (м/с²).

Аналогично, погрешность определения масштабного коэффициента акселерометра A_y не превысила $8.6 \cdot 10^{-4}$, В (м/с²).

Первоначальная азимутальная привязка оси чувствительности Y-канала датчика угловой скорости (ДУС) была выполнена с применением гироскопического компаса модели 1Г17, обеспечивающего точность измерений со среднеквадратическим отклонением (СКО), не превышающим 30 угловых секунд.

Посредством двухкоординатной оптической делительной головки ось Y-канала ДУС была выставлена в направлении «Восток–Запад». Погрешность данной ориентации составила не более 10 угловых секунд. Данное положение является нулевым для измерений, поскольку проекция вектора угловой скорости вращения Земли на данную ось чувствительности в этой конфигурации равна нулю.

Последующий поворот шпинделя делительной головки вместе с закреплённым на нём датчиком на 90° был проведён с аналогичной высокой точностью (погрешность ≤ 10 угл. сек.). В результате этого манёвра ось чувствительности Y-канала ДУС заняла положение, при котором производится измерение ненулевой горизонтальной составляющей угловой скорости вращения Земли.

Предложенный принцип и алгоритм определения азимутального угла не требует высокой точности калибровки ДУС. Поэтому при расчёте величины горизонтальной проекции угловой скорости вращения Земли уклонение отвеса не учитывалось. В итоге для обеспечения масштабного коэффициента канала Y ДУС ($K_\omega = 0.25$, В/(град/час)) напряжение на выходе преобразователя «ток – напряжение», должно быть равно 2.0781 В.

Эксперименты были проведены при условиях:

- ось вращения платформы вертикальна;
- постоянная времени фильтра низких частот, включенного последовательно к выходной цепи ДУС – 10 с;
- скорость вращения платформы – 6,92 град/с;
- температура в помещении лаборатории – + 25° С;
- заданное значение угла Ψ , определённое с помощью гироскопического компаса 1Г17 – 186°07'10";
- заданное значение угла ε_N ($\varepsilon_{N0} = 360^\circ - \Psi$) – 173°52'50".

Подавление влияния фазовой погрешности ДУС. При вращении платформы в одну и в другую сторону на 1 оборот были сняты значения, $\vec{\varepsilon}_1$, $\vec{\varepsilon}_2$, $\vec{\varepsilon}_1$ и $\vec{\varepsilon}_2$ с учётом, что в положении платформы, характеризующемся углом $\vec{\varepsilon}_1$, производная сигнала ДУС положительна. Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты исследований по оценке эффективности подавления влияния фазовой погрешности ДУС

	Вектор угловой скорости вращения платформынаправлен вниз		Вектор угловой скорости вращения платформынаправлен вверх		Абсолютная погрешность
	$\vec{\varepsilon}_{1\uparrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2\downarrow}$	$\vec{\varepsilon}_{1\uparrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2\downarrow}$	
	95°46'59"	292°16'23"	231°56'32"	76°24'32"	
$\vec{\varepsilon}_N$	194°1'41"				20°08'51"
$\vec{\varepsilon}_N$			154°10'32"		19°42'18"
ε_N	174°6'7"				0°13'16"

Полученные результаты показывают, что предлагаемые приёмы замеров и алгоритм 3.20 позволяют резко уменьшить влияние фазовой погрешности ДУС на точность определения угла ε_N .

Подавление влияния шума ДУС. Для оценки эффективности подавления влияния шума ДУС в определении угла ε_N были проведены эксперименты при вращении в обе стороны на 1 оборот, 2 оборота и 3 оборота. Результаты экспериментов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты исследований по оценке эффективности подавления влияния шума ДУС

n	Вектор угловой скорости вращения платформы направлен вниз		Вектор угловой скорости вращения платформы направлен вверх		ε_N	Абсолютная погрешность
	$\vec{\varepsilon}_{2i-1\uparrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2i\downarrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2i-1\uparrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2i\downarrow}$		
1	95°46'59"	292°16'23"	231°56'32"	76°24'32"	174°6'7"	13'16"
2	93°52'34"	292°12'33"	230°48'47"	77°53'10"	173°56'1"	3'11"
	93°55'16"	293°27'18"	232°56'21"	76°22'5"		
3	91°43'59"	294°3'38"	232°33'29"	75°48'26"	173°52'18"	32"
	91°22'16"	293°15'18"	233°7'20"	75°46'56"		
	92°48'22"	294°25'52"	233°39'29"	77°52'30"		

Проверка стабильности определения угла ε_N . С этой целью были проведены измерения и вычисления по трём пускам, результаты которых сведены в таблицу 3. Математическое ожидание угла ε_N : $173^\circ 51' 15''$. Среднеквадратическое отклонение по результатам 3-х пусков: $0^\circ 01' 15''$. Абсолютная погрешность по сравнению с заданным значением: от $0^\circ 00' 32''$ до $0^\circ 03' 21''$. Т.е., абсолютная погрешность определения угла Ψ по сравнению с заданным значением также составляет: от $0^\circ 00' 32''$ до $0^\circ 03' 21''$.

Таблица 3. Результаты проверки стабильности определения угла ε_N

№ пуск	Вектор угловой скорости вращения платформы направлен вниз		Вектор угловой скорости вращения платформы направлен вверх		ε_N
	$\vec{\varepsilon}_{2i-1\uparrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2i\downarrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2i-1\uparrow}$	$\vec{\varepsilon}_{2i\downarrow}$	
1	$91^\circ 43' 59''$	$294^\circ 3' 38''$	$232^\circ 33' 29''$	$75^\circ 48' 26''$	$173^\circ 52' 18''$
	$91^\circ 22' 16''$	$293^\circ 15' 18''$	$233^\circ 7' 20''$	$75^\circ 46' 56''$	
	$92^\circ 48' 22''$	$294^\circ 25' 52''$	$233^\circ 39' 29''$	$77^\circ 52' 30''$	
2	$91^\circ 46' 27''$	$293^\circ 48' 29''$	$230^\circ 2' 21''$	$78^\circ 8' 35''$	$173^\circ 49' 29''$
	$91^\circ 28' 45''$	$293^\circ 19' 30''$	$232^\circ 17' 57''$	$76^\circ 49' 38''$	
	$93^\circ 9' 33''$	$293^\circ 59' 28''$	$233^\circ 35' 57''$	$77^\circ 27' 8''$	
3	$92^\circ 19' 2''$	$293^\circ 17' 50''$	$231^\circ 25' 30''$	$77^\circ 48' 0''$	$173^\circ 51' 58''$
	$91^\circ 53' 53''$	$293^\circ 9' 47''$	$233^\circ 9' 26''$	$76^\circ 27' 8''$	
	$92^\circ 41' 42''$	$293^\circ 37' 16''$	$233^\circ 53' 39''$	$76^\circ 40' 20''$	

Проверка разработанных алгоритмов вычисления параметров ориентации наземного прибора ориентации. Проверка разработанных алгоритмов выполнена при 70 различных угловых пространственных положениях прибора. В этих положениях углы Θ и Φ принимали значения от 0 до 15 градусов, угол Ψ задавался в диапазоне от 0 до 360 градусов с шагом 90 градусов и 60 градусов.

Результаты экспериментов показали, что:

- полученные данные подтверждают достоверность разработанных алгоритмов определения параметров ориентации корпуса НПО;
- абсолютная погрешность определения двух углов, характеризующих ориентацию корпуса прибора относительно плоскости горизонта, не превышает одной угловой минуты;
- абсолютная погрешность определения азимута корпуса прибора не более 20 угловых минут.

Анализ результатов. Проведенный анализ экспериментальных данных выявил превышение допустимого порога погрешности (составляющего 1-2 угловые минуты) при определении угла Ψ в условиях вертикальной ориентации оси вращения платформы. Ключевым фактором, обусловившим возникновение данной погрешности, была идентифицирована нестабильность угловой скорости вращения платформы. Для количественной оценки данной нестабильности был применен электронно-счетный частотомер (ЭСЧ), анализирующий сигнал, генерируемый схемой формирования кода угла (СФКУ). Измерения проводились на временных интервалах, соответствующих одному полному обороту платформы. Расчет угловой скорости выполнялся по алгоритму, основанному на делении величины угла поворота на соответствующее временное значение.

Величина угла поворота определялась как произведение количества импульсов, зафиксированных частотомером на выходе СФКУ, на величину угловой дискреты преобразования. На рис. 6 представлена зависимость, иллюстрирующая изменение угловой скорости вращения платформы в течение одного оборота при времени счета 1 секунда. Анализ графика демонстрирует, что нестабильность скорости вращения достигает значительной величины — 4-5%.



Рис. 6. График, отражающий изменение скорости вращения платформы в течение одного оборота

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что нестабильность скорости вращения платформы оказывает существенное влияние на фазовые погрешности как датчика угловой скорости (ДУС), так и подключенного к его выходу фильтра нижних частот (ФНЧ) последовательного типа. Поскольку в экспериментальной установке использован ФНЧ с повышенным значением постоянной времени ($\tau = 10$ с), вариация его фазовой погрешности, обусловленная флуктуациями скорости вращения, значительно превышает аналогичное изменение фазовой погрешности самого ДУС.

В связи с данным обстоятельством, для выполнения приближенной оценки воздействия нестабильности вращения платформы на точность определения угла Ψ в рассматриваемых условиях правомерно ограничиться анализом исключительно фазовой погрешности, вносимой звеном ФНЧ в измерительный тракт [10].

Использованный в установке ФНЧ представляет собой апериодическое звено второго порядка, передаточная функция которого имеет вид

$$K(p) = \frac{1}{(0.74 \cdot p + 1) \cdot (1.41 \cdot p + 1)}.$$

Сдвиг фаз такого звена определяется формулой [11]

$$\Delta\varphi(\omega) = -\arctg(0.74 \cdot \omega) - \arctg(1.41 \cdot \omega).$$

где ω – угловая скорость вращения платформы.

В экспериментах средняя скорость вращения платформы составляет 6.923 град/с (0.121 рад/с). Этой скорости соответствует сдвиг фаз:

$$\Delta\varphi(0.121) = -14.7986 \text{ град.}$$

При уменьшении скорости вращения платформы на 5% от средней скорости ($\omega = 0.115$ рад/с) сдвиг фаз будет:

$$\Delta\varphi(0.115) = -14.0745 \text{ град.}$$

Т.е., в данном случае изменение фазовой погрешности составляет 43.4 угл. мин.

При уменьшении скорости вращения платформы на 1% от средней скорости ($\omega = 0.11979$) сдвиг фаз будет:

$$\Delta\varphi(0.11979) = -14.6527 \text{ град.}$$

Т.е., в данном случае изменение фазовой погрешности составляет 8.7 угл. мин.

Приведённые оценки позволяют сделать вывод о том, что если нестабильность скорости вращения платформы уменьшить до 1%, то можно ожидать уменьшение погрешности определения угла Ψ до 5 раз.

Проведенное детальное исследование кинематической схемы применяемого привода выявило неоптимальный выбор его ключевых компонентов: мощность исполнительного двигателя оказалась недостаточной для обеспечения требуемых динамических характеристик, а передаточное число редуктора — не соответствующим необходимым критериям.

В целях повышения точности измерений азимутального угла корпуса наземного прибора ориентации (НПО) необходима модернизация системы стабилизации, направленная на существенное увеличение точности поддержания угловой скорости вращения платформы, обеспечиваемой интегрирующим приводом.

Выводы. На специально спроектированном, изготовленном и прошедшем полный цикл метрологической аттестации функционирующем макете наземного прибора ориентации (НПО), в основе работы которого заложен принцип аналитического гирокомпасирования, был выполнен комплекс экспериментальных исследований. В ходе испытаний получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально верифицирована высокая эффективность предложенной архитектуры прибора, основанной на применении вращающегося датчика угловой скорости (ДУС), и специализированного алгоритма вычисления угла, определяющего пространственную ориентацию проекции вектора угловой скорости вращения Земли на экваториальную плоскость прибора.

2. Получено практическое подтверждение адекватности и точности алгоритмического обеспечения, разработанного в третьей главе, для расчёта углов Эйлера-Крылова, описывающих ориентацию НПО относительно горизонтной географически ориентированной системы координат.

3. Установлено, что погрешность определения азимутального угла ориентации макета НПО при вертикальной установке прибора не превышает $0^{\circ}03'21''$. В результате детального анализа идентифицирована ключевая причина возникновения данной погрешности – нестабильность задания угловой скорости вращения платформы на начальном этапе запуска, обеспечиваемой интегрирующим приводом.

4. Продемонстрировано, что обеспечение стабильности поддерживаемой скорости вращения на уровне не хуже 1% позволяет достичь точности определения азимутального угла в пределах 1–2 угловых минут.

Экспериментальные работы, включавшие этапы настройки и калибровки измерительной установки, подчеркнули критическую важность минимизации уровня шумовых составляющих в выходном сигнале ДУС. В связи с этим, при разработке электронных модулей, обслуживающих ДУС и акселерометры (включая источники электропитания), необходимо применять комплекс современных технических и конструкторских решений для обеспечения электромагнитной совместимости:

- использование линейных (а не импульсных) источников питания;
- применение многоступенчатых развязывающих фильтров в цепях питания;
- реализация эффективных схем экранирования чувствительных компонентов;
- рациональное трассирование печатных плат и монтажных проводников.

В процессе проектирования, изготовления и метрологической калибровки макета НПО были разработаны и апробированы перспективные технические решения, которые представляют значительный интерес для последующего использования при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию серийного образца прибора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тан, С. Специализированное устройство контрольно-измерительного стенда для аттестации прецизионных гироскопов / С. Тан, В. П. Подчерзцев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2016. – № 6(111). – С. 15-30.
2. Подчерзцев, В. П. Компоненты модели погрешностей динамически настраиваемого гироскопа / В. П. Подчерзцев, С. Тан, Ц. Цинь // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 1. – С. 8-18.
3. Матвеев, В. А. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах: учебное пособие по курсу "Теория гироскопов и гиросtabilизаторов" / В. А. Матвеев, В. П. Подчерзцев, В. В. Фатеев; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 103 с. – ISBN 5-7038-2254-8.
4. Подчерзцев, В. П. Повышение динамической точности гироскопа с внутренним упругим карданным подвесом в режиме датчика угловой скорости / В. П. Подчерзцев, Д. З. Нгуен // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2021. – № 4(137). – С. 188-207. – DOI 10.18698/0236-3933-2021-4-188-207.
5. Подчерзцев, В. П. Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilизаторе / В. П. Подчерзцев, Ц. Цинь // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 10(70). – С. 8. – DOI 10.18698/2308-6033-2017-10-1682.
6. Климашов, Б. М. Радиолокационный измеритель малых высот для посадки летательных аппаратов / Б. М. Климашов // Авиакосмическое приборостроение. – 2010. – № 11. – С. 27-32.
7. Лесных, И. В. Импульсный лазерный дальномер сверхвысокой точности / И. В. Лесных // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 3. – С. 127-130.
8. Михляев, С. В. Погрешности измерения лазерного триангуляционного дальномера при зондировании наклонной зеркальной поверхности / С. В. Михляев // Датчики и системы. – 2007. – № 4. – С. 11-14.
9. Калихман, Д. М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / Д. М. Калихман. – Санкт-Петербург: "Электроприбор", 2008. – 296 с. – ISBN 5-900780-82-5.
10. Урядов, Д. А. Разработка устройств поддержания угловой скорости повышенной точности / Д. А. Урядов, В. В. Скотников // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – № 3(15). – С. 159-165.
11. Седышев, В. В. Управление угловым движением одноосного испытательного стенда гироскопических систем / В. В. Седышев, П. Е. Белочкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 42-50.

Поступила в редакцию 29.08.2025 г., рекомендована к печати 17.09.2025 г.

METHODS AND RESULTS OF EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ACCURACY OF ORIENTATION OF A GROUND INSTRUMENT USING A DYNAMICALLY ADJUSTABLE GYROSCOPE

Naumov M.A., Volueva O.S.

The article presents the results of experimental studies of the accuracy of determining the orientation of a ground-based instrument (NPO) using a dynamically tuned gyroscope (DNG) and accelerometers. The main attention is paid to evaluating the effectiveness of suppressing the effect of defects in angular velocity sensors on the accuracy of measuring orientation angles. Algorithms for calculating Euler-Krylov angles have been developed and tested, providing accuracy of up to 1 arc minute for tilt angles and up to 20 arc minutes for azimuth. It is established that the main reason for the error is the instability of the rotation speed of the platform. It is shown that reducing the instability to 1% makes it possible to reduce the error to 1-2 arc minutes. The results can be used in the design of high-precision navigation systems.

Keywords: gyroscope, sensor, angular velocity, accelerometer, orientation, navigation, algorithms, error.

Наумов Максим Александрович

младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова», аспирант кафедры автоматики и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: maksim-naumov-99@bk.ru

Naumov Maksim Aleksandrovich

Junior researcher of the Scientific Research Department of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov, Postgraduate student at Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Волуева Ольга Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: voluevaos@gmail.com

Volueva Olga Sergeevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА ГЕНЕРАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ML-МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИКИ АНОМАЛИЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦОД С ПОМОЩЬЮ OPENMODELICA

© 2025 Поляков С.О., Ронкин М.В., Буторова А.С., Борисов В.И.

Разработана динамическая модель системы охлаждения ЦОД в OpenModelica с использованием библиотеки DLR ThermoFluidStream для анализа аномалий (утечки хладагента, засорения). Предложена инновационная двухэтапная методика (имитация в OpenModelica + обработка в Python), позволяющая в 300 раз эффективнее синтезировать зашумленные данные для анализа отказов по сравнению с нативным моделированием. Модель позволяет воспроизводить критические сценарии в контролируемых условиях и предназначена для тестирования алгоритмов диагностики и оптимизации архитектуры систем охлаждения на этапе проектирования, а также позволяет генерировать синтетические данные для обучения предиктивных ML-моделей.

Ключевые слова: ЦОД, охлаждение, динамическое моделирование, OpenModelica, аномалии, синтез данных, Python, DLR ThermoFluidStream.

Введение. Современные центры обработки данных (ЦОД) являются энергоемкими объектами, где системы охлаждения играют решающую роль в поддержании стабильной работы ИТ-оборудования. Согласно исследованиям, до 40% общего энергопотребления ЦОД приходится именно на охлаждение [1], что делает повышение эффективности этих систем критически важным для снижения углеродного следа и операционных расходов. Однако даже незначительные аномалии в работе охлаждающей инфраструктуры способны нарушить энергетический баланс.

Несмотря на активное внедрение датчиков и алгоритмов машинного обучения для мониторинга [2], в научной литературе сохраняется пробел: отсутствуют комплексные модели, позволяющие воспроизводить аномалии на этапе проектирования систем охлаждения. Большинство существующих работ фокусируется на постфактум-анализе данных, тогда как превентивное моделирование могло бы оптимизировать архитектуру ЦОД и минимизировать эксплуатационные риски. Это определяет необходимость разработки инструментов, таких как динамические модели в OpenModelica, для имитации аномалий в контролируемых условиях.

Анализ современных исследований позволяет систематизировать основные типы аномалий в системах охлаждения ЦОД и оценить потенциал инструментов динамического моделирования для их изучения.

Наиболее критичными для работы ЦОД являются следующие аномалии:

1. Утечки хладагента. Даже медленная утечка фреона приводит к прогрессирующему снижению давления в контуре, что нарушает теплопередачу и увеличивает энергопотребление компрессоров [3].

Статья подготовлена в ходе реализации Комплексного проекта научно-технологического развития «Платформа автоматического управления промышленными объектами информационной инфраструктуры на базе искусственного интеллекта на примере центров обработки данных (ЦОД)» (Соглашение № 25 от «14» мая 2025 г. с Фондом технологического развития промышленности Свердловской области).

Исследование частично выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0003.

Утечки в 15% объема хладагента снижают холодопроизводительность на 35%, применение методов Extremely Randomized Trees (EXT) и Light Gradient Boosting (LGB) позволяет обнаружить постепенную утечку с потерей 34,7% объема жидкости за более чем 13 дней, а быструю утечку с потерей 57,4% хладагента только за 8 часов [4].

2. Гидродинамические засоры. Накопление примесей в трубопроводах или конденсаторах вызывает рост давления, перегрев оборудования и снижение КПД. Например, увеличение давления на 40% в системах с засоренными фильтрами, приводит к аварийным отключениям в 70% случаев [5].
3. Сбои вентиляции. Неравномерное распределение воздушных потоков из-за поломок вентиляторов или ошибок проектирования создает «горячие зоны» в ЦОД. Локальный перегрев на 5...8°C увеличивает частоту отказов серверов на 20...25% [1].

Анализ современных исследований позволяет систематизировать основные типы аномалий в системах охлаждения ЦОД и оценить потенциал инструментов динамического моделирования для их изучения. Однако ключевым вызовом для разработки таких предиктивных моделей является недостаток размеченных данных о редких, но критичных аномалиях, собранных в реальных условиях. Накопление достаточного объема подобных данных эксплуатационным путем занимает годы и сопряжено с высокими рисками. В связи с этим, целью данного исследования является разработка на базе OpenModelica инструмента для генерации синтетических данных, имитирующих штатные и аномальные режимы работы систем охлаждения ЦОД.

Материалы и методы. Современное моделирование термо-флюидных систем сталкивается с серьёзными проблемами, вызванными наличием нелинейных уравнений большой размерности и высокой сложностью их решения. Динамика потоков жидкости и газа в технически сложных системах (автомобильные двигатели, промышленные установки, авиационное оборудование) порождает значительные трудности при создании достоверных моделей [6].

Исследователи из Немецкого космического агентства (DLR) предложили инновационную методологию, реализованную в открытой библиотеке DLR ThermoFluidStream, которая решает ряд указанных проблем. Рассмотрим подробнее математические основания и подходы, применяемые в этой библиотеке.

DLR ThermoFluidStream построена на основе широко распространённого языка Modelica, поддерживающего объектно-ориентированное моделирование физических процессов. Центральным понятием является концепция термо-флюидной сети, состоящей из отдельных компонентов, соединённых трубопроводами и каналов для переноса жидкости или газа [7].

Каждый элемент в сети характеризуется определёнными параметрами:

- массовым расходом ($\dot{m}$),
- давлением (p),
- энтальпией (h),
- составом жидкости или газа.

Эти параметры связаны между собой уравнениями сохранения массы, импульса и энергии, формирующими основу любой физической модели.

Основная проблема при моделировании заключается в формировании больших нелинейных систем уравнений, возникающих при совместном рассмотрении компонентов сети. Традиционно такие системы сложно решить из-за наличия множественных корней или полного отсутствия решений.

Решению этой проблемы способствует ключевой механизм библиотеки – разделение уравнений на отдельные блоки и введение особой величины – инертного давления (r). Именно этот подход радикально меняет структуру уравнений и делает их решение доступным [8].

Инертное давление (r) отражает влияние ускорения или торможения потока жидкости или газа на результирующее давление в точке соединения. Его формула выводится из уравнения Эйлера, описывающего движение жидкости вдоль трубы постоянного сечения:

$$\rho v \frac{dv}{ds} = - \frac{dp}{ds},$$

где: ρ – плотность жидкости,
 v – средняя скорость потока,
 s – координата вдоль оси трубы.

Переформулируем уравнение через массовый расход ($\dot{m}$) и получаем выражение для инертного давления:

$$r = L \frac{d\dot{m}}{dt},$$

где L – инерционная константа, зависящая от геометрической формы тракта.

Преимуществом введения инертного давления является значительное снижение размеров нелинейных систем уравнений. Вместо единой крупной системы каждое соединение элементов рассматривается отдельно, а уравнения приобретают простую структуру, удобную для аналитического решения.

Структуру уравнений можно представить следующим образом:

1. Каждый компонент (насос, теплообменник, дроссель и т.п.) имеет входящий и исходящий потоки, характеризующиеся своими параметрами (давление, массовый расход, состав).
2. Соединения между компонентами задаются уравнением баланса давления:

$$P_{\text{вых},i} = P_{\text{вх},j} + r_j - r_i,$$

где индекс i обозначает выходной поток элемента, а j – входящий поток следующего элемента.

Такая структура позволяет строить цепочки последовательных соединений, сводя расчёт каждого участка к элементарному виду.

Обобщённая схема формирования уравнений выглядит следующим образом:

1. Входящие и исходящие потоки формируют систему уравнений баланса для каждой пары соединений.
2. Каждое соединение подчиняется закону сохранения массы и энергии, обеспечивающему непрерывность потоков.
3. Параметры состава жидкости (энтальпия, давление, температура) рассчитываются отдельно для каждого элемента и узла сети.

Разделение уравнений таким образом резко уменьшает размеры нелинейных блоков и ускоряет численное решение всей системы.

Особенностью предлагаемого подхода является гарантированная возможность корректной инициализации модели независимо от начальных условий. Поскольку система строится на простых уравнениях, обеспечивается отсутствие ситуаций, когда отсутствует решение, либо имеются некорректные корни.

Поддерживается чувствительность к изменению внешних факторов (температуры, нагрузки, конструктивных особенностей) благодаря автоматической адаптации параметров каждого элемента сети.

Платформа OpenModelica активно используется для моделирования сложных термодинамических систем, включая HVAC и охлаждение ЦОД. Ниже представлены ключевые направления её применения на основе анализа современных исследований.

OpenModelica хорошо подходит для моделирования систем охлаждения ЦОД с использованием объектно-ориентированного подхода [9]. Авторы разработали детальную модель, включающую:

- компрессоры: учет изэнтропической эффективности и зависимости производительности от давления;
- конденсаторы: теплообмен между хладагентом и окружающей средой, включая параметры теплопроводности;
- трубопроводы: гидравлические потери и инерционные эффекты потока.

Модель успешно воспроизвела динамику утечек хладагента и засоров, показав погрешность менее 5% при сравнении с экспериментальными данными.

Также можно использовать библиотеку Modelica Buildings Library для проектирования адаптивных алгоритмов управления чиллерными установками [10]. Результаты показали:

- снижение энергопотребления на 15% за счет динамической регулировки температуры подачи воды;
- возможность интеграции модели с системами реального времени для предиктивного управления.

Несмотря на успехи в смежных областях, применение OpenModelica для моделирования аномалий именно в системах охлаждения ЦОД остается малоизученным. Большинство существующих работ фокусируется на штатных режимах, тогда как воспроизведение критических сценариев (утечки, засоры) требует адаптации математических моделей под специфику ЦОД – переменную нагрузку, нелинейные тепловые потоки и взаимодействие с ИТ-инфраструктурой (переменными нагрузками).

Модель цикла парового сжатия в OpenModelica. Модель охватывает полный цикл охлаждения, включая компрессор, конденсатор, расширительный клапан, испаритель и ресивер, с использованием воздуха в качестве вторичной среды в обоих теплообменниках (рис. 1). Эта система разработана для демонстрации моделирования реалистичного холодильного цикла с учетом элементов управления и их взаимодействия в условиях изменяющихся внешних факторов.

Цикл парового сжатия состоит из следующих ключевых компонентов:

1. Компрессор: повышает давление паров хладагента, обеспечивая движение рабочего тела в цикле.

2. Конденсатор: теплообменник, в котором хладагент конденсируется, отдавая тепло в воздух.

3. Ресивер: хранит избыточный хладагент и гарантирует поступление только жидкой фазы в расширительный клапан.

4. Расширительный клапан: регулирует поток хладагента в испаритель, поддерживая заданные условия работы.

5. Испаритель: теплообменник, где хладагент испаряется, поглощая тепло из воздуха.

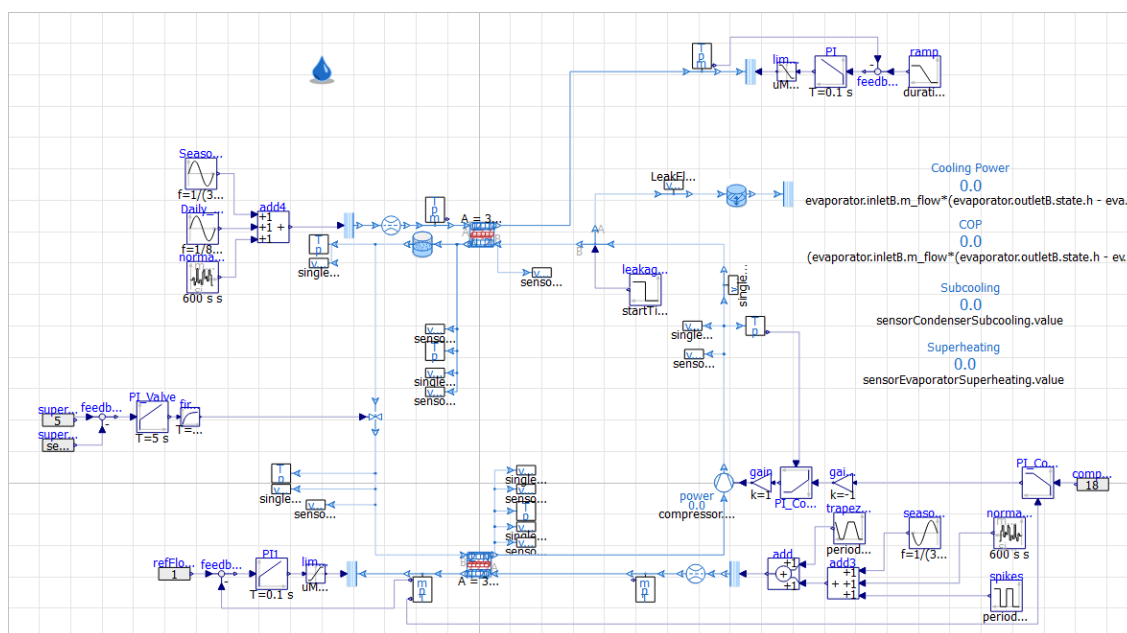


Рис. 1. Модель системы охлаждения ЦОД в среде OpenModelica

Дополнительно в системе присутствуют источники и стоки для воздушных потоков через конденсатор и испаритель, а также датчики для измерения температур, давлений и массовых расходов.

В качестве хладагента используется R134a, а вторичной средой в обоих теплообменниках выступает сухой воздух.

Модели компонентов:

- теплообменники: конденсатор и испаритель смоделированы как противоточные теплообменники с упрощенной дискретизацией в одну ячейку для повышения вычислительной эффективности;
- ресивер: имеет заданный объем для буферизации хладагента и стабилизации работы системы;
- расширительный клапан: представлен регулирующим клапаном с линейной характеристикой потока, управляемым в зависимости от условий системы;
- компрессор: Оснащен регулируемой частотой вращения для адаптации к потребностям системы.

Для регулирования работы системы реализовано несколько контуров управления:

- контроллер регулирует поток воздуха через конденсатор для поддержания заданной температуры на выходе;
- аналогичный контроллер управляет воздушным потоком через испаритель;
- открытие расширительного клапана регулируется на основе перегрева на выходе испарителя;
- частота вращения компрессора корректируется в зависимости от температуры воздуха на выходе испарителя и давления в конденсаторе.

Модель рассчитана на симуляцию цикла охлаждения в течение длительного периода, что позволяет учитывать долгосрочные изменения и вариации. Внешние условия, такие как температуры воздуха на входе в теплообменники, моделируются с учетом сезонных и суточных колебаний, отражающих реальные сценарии эксплуатации.

Дополнительные особенности:

- моделирование утечек: Включен компонент, симулирующий утечку хладагента из системы после заданного времени;
- моделирование засорения внешнего теплообменника (воздушной части конденсатора) за счёт постепенного уменьшения величины массового расхода воздуха;
- вариации окружающей среды: Температуры воздуха на входе в теплообменники включают сезонные, суточные и случайные изменения для имитации реальных условий.

С 35 дня моделирования начинается рост температуры воздуха на выходе конденсатора и мощности компрессора. По росту этих показателей мы можем сказать, что количество хладагента в системе уже недостаточно для переноса выделяемого нагрузкой тепла. Когда уровень хладагента достигает критически низкой отметки (41 день моделирования) система уже не в состоянии поддерживать требуемое фазовое состояние (жидкое после конденсатора), несмотря на резкий рост мощности компрессора для компенсации падения давления хладагента. Остаток хладагента взрывообразно переходит в газообразное состояние и дальнейшее моделирование уже не имеет физического смысла [11]. Результаты моделирования режима с постоянной мощностью тепловой нагрузки и линейной утечкой хладагента по ключевым переменным представлены на рис. 2.

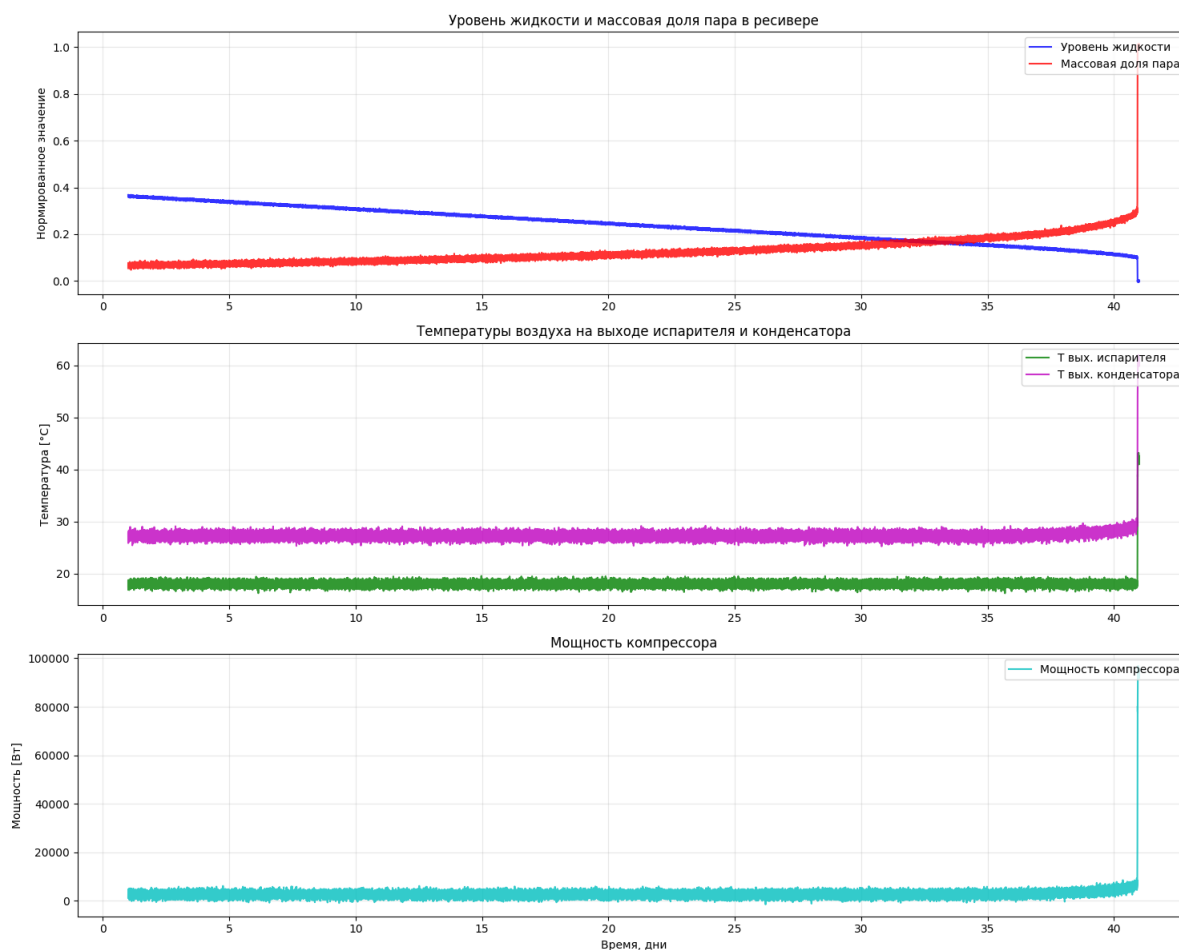


Рис. 2. Результат моделирования линейной утечки хладагента в среде OpenModelica

Строго говоря, вероятность возникновения подобного состояния у реальной системы охлаждения ЦОД можно оценить как крайне низкую из-за вмешательства системы управления при приближении параметров работы к критическим. Тем не менее, даже без разрушения оборудования аварийная остановка по понятным причинам крайне нежелательна. Кроме того, по этой же причине возможность подробного моделирования аварийных процессов вплоть до этапа катастрофического разрушения представляет интерес как в вопросах оптимизации эксплуатации, так и для обучения моделей машинного обучения для предиктивной диагностики подобных отказов на ранних стадиях.

Оптимизация моделирования шума в OpenModelica. Прямое (нативное) моделирование стохастических процессов, таких как шум измерительных датчиков, в средах детерминированного моделирования, к которым относится OpenModelica, сопряжено с существенными вычислительными затратами. Введение в модель случайных функций через блоки (например, Modelica.Blocks.Noise) резко увеличивает жесткость системы дифференциальных уравнений, что требует значительного уменьшения шага интегрирования. Как показали эксперименты, это может замедлить процесс симуляции более чем в 300 раз для сложных термо-флюидных систем, что делает данный подход непрактичным для длительных динамических исследований. Так, в одном из экспериментов моделирование системы в установившемся режиме без шума в масштабе 24 часов занимает 40,1 с, а с добавлением нативных шумов время моделирования при неизменных прочих параметрах увеличивается до 11817,5 с.

Для преодоления этого ограничения была разработана методика, которая переносит генерацию шума на этап постобработки. Её ключевая идея заключается не в простом добавлении белого шума к сигналу, а в точном воспроизведении того воздействия, которое нативный шум оказывает на всю систему. Это воздействие является комплексным, так как шум, добавленный в одном месте (на входе), фильтруется динамикой системы и проявляется на всех связанных выходах.

Методика реализована в два этапа: первый проводится в OpenModelica, второй – средствами Python.

Этап 1: идентификация передаточных функций системы на шумовое воздействие

1. Параллельное моделирование: проводятся два идентичных динамических расчета системы:

- чистая модель (Clean): запускается без какого-либо шума. Результаты сохраняются в clean_data.csv;
- нативная шумовая модель (Noisy): запускается с нативно добавленным шумом к ключевым входным параметрам (в данном случае, к температурам воздуха на входе в конденсатор и испаритель T_{cond_in} , T_{evap_in}). Результаты сохраняются в noisy_data.csv.

2. Расчет разностных сигналов: для каждого интересующего параметра Y (например, температура на выходе испарителя, давление конденсации) рассчитывается сигнал разности между зашумленной и чистой моделью. Этот сигнал представляет собой отклик системы на шумовое воздействие:

$$\Delta Y(t) = Y_{noisy}(t) - Y_{clean}(t).$$

3. Идентификация передаточных функций: для каждой релевантной пары «входное возмущение» – «выходной отклик» применяется параметрический метод системной идентификации во временной области. Целью является нахождение параметров (коэффициентов) передаточной функции $H_{ij}(s)$, которая минимизирует расхождение между смоделированным и реальным откликом системы:

- выбор структуры модели: на основе анализа физики процессов и частотных характеристик системы (полученных предварительным БПФ-анализом) для большинства связей была выбрана модель в виде апериодического звена 1-го или 2-го порядка:

$$H(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$$

или

$$H(s) = \frac{K}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1}.$$

- решение задачи оптимизации: Для подбора параметров (K , τ , ζ) использовался алгоритм нелинейного метода наименьших квадратов (реализованный в функции `scipy.optimize.least_squares`). Критерием оптимизации было минимальное среднеквадратичное отклонение между смоделированным откликом модели $H_{ij}(s)$ на входной шум $N_i(s)$ и рассчитанным откликом $\Delta Y_j(s)$:

$$\Delta Y_j(s) = H_{ij}(s) \cdot N_i(s),$$

где $N_i(s)$ – спектр шума, добавленного на вход i , а $\Delta Y_j(s)$ – спектр отклика на выходе j .

Этап 2: синтез данных с шумом на основе идентифицированных моделей

После идентификации набора передаточных функций $H_{ij}(s)$ необходимость в медленной нативной симуляции с шумом отпадает. Процедура генерации новых зашумленных данных выглядит следующим образом:

1. Генерация независимого шума: для каждого входного параметра генерируется свой независимый шумовой сигнал $n_i(t)$ с заданными статистическими (стандартное отклонение σ_i и спектральными (PSD, $S_i(f)$) характеристиками, соответствующими исходному нативному шуму.

2. Фильтрация шума через передаточные функции: каждый сгенерированный шумовой сигнал пропускается через все соответствующие ему идентифицированные передаточные функции. Это позволяет получить составляющие отклика на всех выходах:

$$\Delta Y_{ji}(t) = \mathcal{L}^{-1}[H_{ij}(s) \cdot N_i(s)],$$

где $\mathcal{L}^{-1}$ обозначает обратное преобразование Лапласа (реализованное в виде цифровых БИХ-фильтров в Python).

3. Суммирование вкладов: Результирующий шум для каждого выходного параметра j вычисляется как сумма всех частных откликов от всех входных шумов:

$$\Delta Y_{j\text{ total}}(t) = \sum \Delta Y_{ji}(t).$$

4. Наложение на чистый сигнал: Итоговый зашумленный сигнал формируется путем добавления суммарного шума к результату чистой симуляции:

$$Y_{\text{simulated } j}(t) = Y_{\text{clean } j}(t) + \Delta Y_{j\text{ total}}(t).$$

Разработанная методика была реализована в виде скрипта на Python с использованием библиотек SciPy (для идентификации и фильтрации), NumPy и Pandas. Её ключевые преимущества:

- вычислительная эффективность: время проведения одного динамического эксперимента сокращается с нескольких часов (нативная симуляция) до нескольких минут (чистая симуляция + постобработка).
- физическая достоверность: в отличие от простого наложения шума, метод достоверно воспроизводит именно системный отклик на возмущение, учитывая инерционность, нелинейности и связи между компонентами.
- гибкость: позволяет легко менять характеристики входного шума (σ_i , $S_i(f)$) и мгновенно получать новые реалистичные данные без перезапуска моделирования в OpenModelica.
- воспроизводимость: использование детерминированных ядер генерации псевдослучайных чисел обеспечивает полную воспроизводимость результатов.

В результате представленный подход позволил привести характеристики шумов, синтезированных с помощью передаточных функций в соответствие с шумами, полученными при их нативном моделировании. Например, для мощности компрессора и температуры воздуха на выходе конденсатора результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели оригинального и сгенерированного шума

Параметр	Оригинальный шум		Сгенерированный шум	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Мощность компрессора	121,9443	414,8685	0,0749	414,8685
Температура воздуха на выходе конденсатора	0,1454	1,1826	0,0006	1,1826

Также результаты можно оценить с помощью графиков на установившемся режиме (мощность компрессора и температура воздуха на выходе конденсатора (рис. 3 и рис. 4 соответственно)).

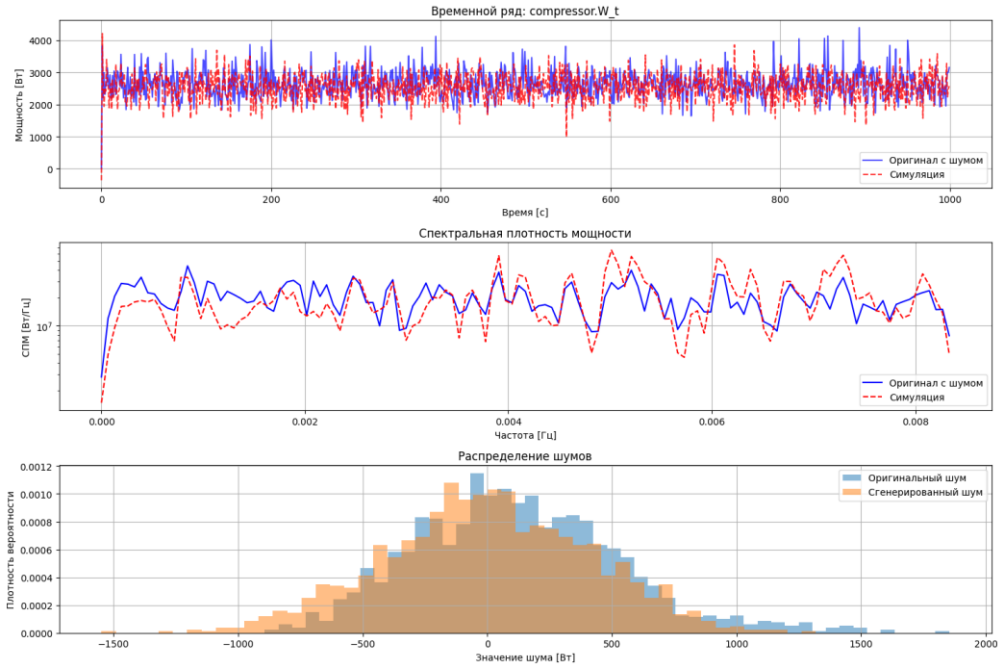


Рис. 3. График мощности компрессора и параметры шума, полученного при моделировании и добавленного после моделирования с применением передаточных функций

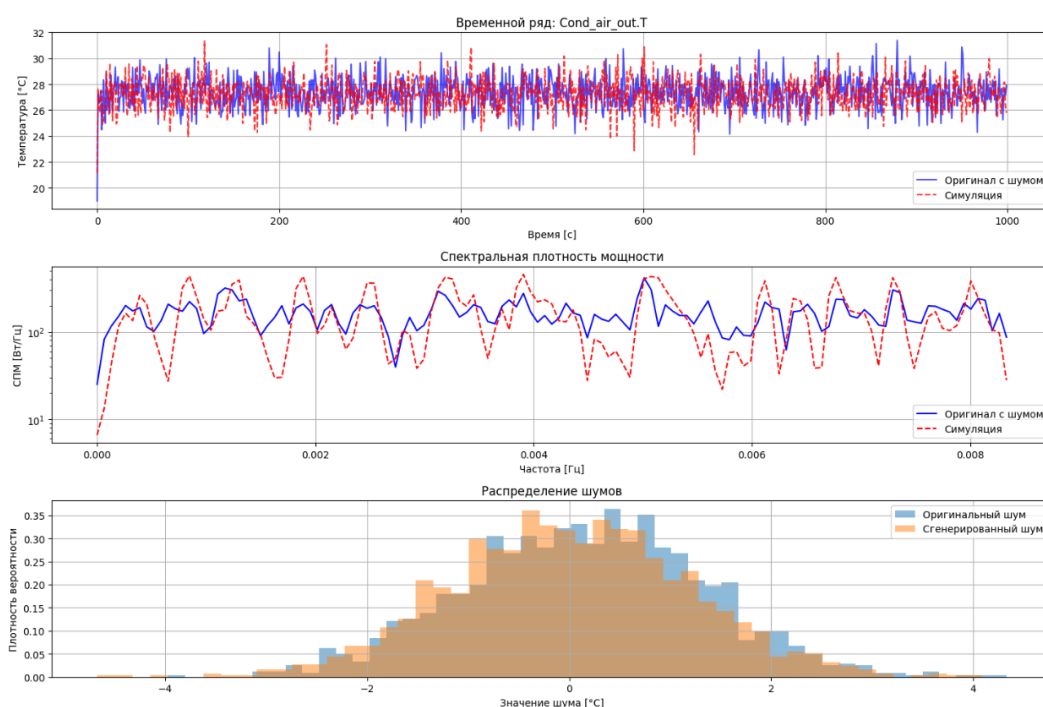


Рис. 4. График температуры воздуха на выходе конденсатора и параметры шума, полученного при моделировании и добавленного после моделирования с применением передаточных функций

Данная методика была успешно применена для генерации больших объемов реалистичных данных, которые можно использовать для обучения и тестирования алгоритмов машинного обучения для детектирования аномалий в системе охлаждения ЦОД.

Выводы. В данной работе была успешно разработана и реализована динамическая модель системы охлаждения центра обработки данных на основе цикла парового сжатия в среде OpenModelica. Модель интегрирует ключевые компоненты холодильного контура (компрессор, конденсатор, расширительный клапан, испаритель, ресивер) и системы управления, что позволяет с высокой точностью имитировать как штатные, так и аварийные режимы работы. Модель адекватно воспроизводит термодинамические и гидродинамические процессы в системе охлаждения ЦОД. Ее архитектура, построенная с использованием объектно-ориентированного подхода, обеспечивает гибкость и масштабируемость для исследования различных конфигураций и сценариев.

Предложена и реализована методика моделирования аномалий. В рамках модели были успешно смоделированы критические аномалии, характерные для ЦОД: утечка хладагента и засорение воздушной стороны конденсатора (наружного блока). Это позволяет изучать динамику развития отказов, их влияние на энергоэффективность (COP, Coefficient of Performance) и температурные режимы, предоставляя ценную информацию для проектирования отказоустойчивых систем.

Разработан и апробирован эффективный метод синтеза зашумленных данных. Предложенный двухэтапный подход (имитация в OpenModelica + идентификация передаточных функций и синтез шума в Python) решает ключевую проблему вычислительной затратности нативного моделирования стохастических процессов. Метод позволяет в сотни раз сократить время получения реалистичных временных рядов данных, сохраняя физическую достоверность отклика системы на возмущения.

Созданная модель и методика являются мощным инструментом для превентивного анализа и оптимизации инфраструктуры ЦОД на этапе проектирования. С их помощью можно оценивать запас надежности системы и ее поведение в условиях изменяющихся нагрузок и внешней среды, тестировать и настраивать алгоритмы управления для минимизации энергопотребления и предотвращения аварийных ситуаций, отрабатывать стратегии детектирования аномалий на синтезированных данных до внедрения в промышленную эксплуатацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nadjahi, C. A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center / C. Nadjahi, H. Louahlia, S. Lemasson // Sustain. Comput. Inform. Syst. – 2018. – V. 19. – P. 14–28.
2. Numerical analysis of adaptive signal decomposition methods applied for ultrasonic gas flowmeters / M.V. Ronkin [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2022. – V. 2425, № 1. – P. 130009.
3. Study on the impacts of refrigerant leakage on the performance and reliability of datacenter composite air conditioning system / Y. Zhang [et al.] // Energy. – 2023. – V. 284. – P. 129336.
4. Refrigerant leak detection in industrial vapor compression refrigeration systems using machine learning / A. Mtibaa [et al.] // Int. J. Refrig. – 2024. – V. 161. – P. 51–61.
5. Soft measurement and prediction of refrigerant leakage based on SVR-LSTM / Y. Yang [et al.] // Int. J. Refrig. – 2023. – V. 152. – P. 303–314.
6. Аверин, Г. В. Обоснование положений термодинамики идеального газа методами математического моделирования / Г. В. Аверин, А. В. Звягинцева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 21–31. – EDN BDVEIL.
7. Zimmer, D. Robust object-oriented formulation of directed thermofluid stream networks / D. Zimmer // Math. Comput. Model. Dyn. Syst. Taylor & Francis. – 2020. – V. 26, № 3. – P. 204–233.
8. Zimmer, D. Robust Simulation of Stream-Dominated Thermo-Fluid Systems: From Directed to Non-Directed Flows / D. Zimmer, N. Weber, M. Meibner // SNE Simul. Notes Eur. – 2021. – V. 31, № 4. – P. 177–184.
9. Equation-based object-oriented modeling and simulation for data center cooling: A case study / Y. Fu [et al.] // Energy Build. – 2019. – V. 186. – P. 108–125.
10. Model-based data center cooling controls comparative co-design / M. Grahovac [et al.] // Sci. Technol. Built Environ. Taylor & Francis. – 2024. – V. 30, № 4. – P. 394–414.
11. Keir, M. C. Dynamic Modeling, Control, and Fault Detection in Vapor Compression Systems / M. C. Keir, A. G. Alleyne // Air Cond. Refrig. Cent. TR-247. Air Conditioning and Refrigeration Center. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign. – 2006. – P. 8–12.

Поступила в редакцию 01.09.2025 г., рекомендована к печати 19.09.2025 г.

**AN EFFICIENT APPROACH TO SYNTHETIC DATA GENERATION FOR TRAINING ML MODELS
IN ANOMALY DIAGNOSIS OF DATA CENTER COOLING SYSTEMS WITH OPENMODELICA**

Poliakov S.O., Ronkin M.V., Butorova A.S., Borisov V.I.

A dynamic model of a data center cooling system has been developed in OpenModelica using the DLR ThermoFluidStream library for the analysis of anomalies, such as refrigerant leakage and flow obstruction. An innovative two-stage methodology is proposed, combining simulation in OpenModelica with data post-processing in Python. This approach enables the synthesis of noisy datasets for fault analysis with up to a 300-fold improvement in efficiency compared to conventional native simulation. The developed model allows critical scenarios to be reproduced under controlled conditions and is intended to support the validation of diagnostic algorithms and the optimization of cooling system architectures at the design stage. In addition, it provides a means for generating synthetic datasets to train predictive machine learning models.

Keywords: Data centers, cooling systems, dynamic simulation, OpenModelica, fault detection, anomaly analysis, data synthesis, Python, DLR ThermoFluidStream.

Поляков Станислав Олегович

старший преподаватель учебно-научного центра «Искусственный интеллект» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: s.o.poliakov@urfu.ru

Poliakov Stanislav Olegovich

Senior Lecturer at Research and Education Center of Artificial Intelligence of Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Russian Federation, Ekaterinburg.

Ронкин Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент учебно-научного центра «Искусственный интеллект» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: m.v.ronkin@urfu.ru

Ronkin Mikhail Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Research and Education Center of Artificial Intelligence of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russian Federation, Ekaterinburg.

Буторова Анастасия Сергеевна

ассистент учебно-научного центра «Искусственный интеллект» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», м.н.с. лаборатории искусственного интеллекта и сложных систем ФГБУН «Институт промышленной экологии УрО РАН», Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: a.s.butorova@urfu.ru

Butorova Anastasiia Sergeevna

Assistant at Research and Education Center of Artificial Intelligence of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Junior researcher at the Laboratory of Artificial Intelligence and Complexity of Institute of Industrial Ecology Systems of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Ekaterinburg.

Борисов Василий Ильич

кандидат технических наук, доцент учебно-научного центра «Искусственный интеллект» ФГАОУ ВО «Институт промышленной экологии УрО РАН», Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: v.i.borisov@urfu.ru

Borisov Vasilii Ilich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Research and Education Center of Artificial Intelligence, of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russian Federation, Ekaterinburg.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПОРТАЛА

© 2025 *Бондаренко В.И., Мартыненко А-А.М., Придворов С.В.*

В данной работе рассматривается применение современных веб-технологий для автоматизации учебной деятельности с использованием динамического веб-приложения. Приведён обзор существующих решений, выделены их ограничения. Представлено собственное решение, включающее авторизацию, тестирование, хранение и управление учебными материалами, обмен сообщениями, визуализацию данных и отчётность. Разработанное приложение реализовано на стеке PHP, MySQL, JavaScript и Bootstrap 5, с использованием хранимых процедур, механизма логирования и адаптивного интерфейса.

Ключевые слова: веб-приложение, автоматизация, обучение, PHP, MySQL, Bootstrap, тестирование, отчёты, сообщения, база данных.

Введение. В условиях ускоренной цифровизации образования учебные заведения сталкиваются с необходимостью не просто автоматизировать отдельные процессы, а выстраивать целостную цифровую образовательную среду, способную адаптироваться к меняющимся условиям и требованиям. Традиционные формы организации обучения — бумажные журналы, фрагментированные электронные таблицы, устаревшие системы управления обучением (LMS) — уже не отвечают требованиям времени. Образовательный процесс требует гибкости, персонализации, постоянной аналитики и высокой степени вовлечённости всех участников [1].

Многочисленные исследования в области цифровой педагогики и технологий e-learning демонстрируют эффективность использования современных веб-приложений, обеспечивающих централизованное управление контентом, автоматизированное тестирование, формирование персонализированных траекторий обучения и удобную коммуникацию между преподавателями и обучающимися. При этом ключевыми требованиями к таким системам становятся безопасность, отказоустойчивость, доступность с различных устройств и возможность адаптации под локальные условия эксплуатации [2].

Однако в российской практике использование крупных зарубежных платформ, таких как Moodle и Google Workspace for Education, всё чаще оказывается затруднено как по техническим, так и по юридическим причинам. В связи с санкционными ограничениями и изменениями в политике доступа некоторые сервисы могут быть частично или полностью недоступны на территории России, что снижает их надёжность и устойчивость к отказам при внедрении в учебную инфраструктуру. Кроме того, многие популярные LMS не допускают глубокой кастомизации без существенных затрат и обладают избыточным функционалом, перегружающим систему при ограниченных вычислительных ресурсах.

В условиях потребности в простом, модульном и расширяемом решении возрастает актуальность разработки открытых, технологически прозрачных образовательных веб-приложений, которые можно адаптировать под конкретные дисциплины, методики преподавания и организационные условия.

Настоящая работа посвящена созданию и внедрению образовательного веб-портала, реализованного на основе PHP 8, MySQL 8, JavaScript и Bootstrap 5. Система ориентирована на комплексную автоматизацию ключевых аспектов учебной деятельности.

Научная новизна заключается в интеграции модульного подхода, механизмов аналитики и персонализированной логики обучения в рамках единой, открытой платформы, устойчивой к ограничениям внешних сервисов.

Практическая значимость заключается в том, что разработанное решение может быть внедрено в учебные заведения различного уровня — от школ до вузов — и легко адаптировано под специфические нужды, обеспечивая полноценную цифровую трансформацию образовательного процесса.

Постановка задачи. Проектирование современного образовательного веб-приложения требует чёткого формулирования задач, стоящих перед системой, с учётом как педагогических, так и технологических требований. Основной целью разработки является создание модульной, расширяемой и технологически открытой информационной системы, предназначенной для автоматизации ключевых этапов учебной деятельности — от управления пользователями и образовательным контентом до сбора статистических данных, их обработки и визуализации результатов.

Система должна обеспечивать простой и интуитивно понятный интерфейс для пользователей с различным уровнем цифровой грамотности, с возможностью разграничения прав доступа по ролям (преподаватель, обучающийся, администратор). При этом требуется реализация защищённой регистрации и авторизации, редактора учебных материалов, конструктора тестов, модуля сообщений и системы аналитики. Приложение должно работать устойчиво как в локальной, так и в сетевой среде, быть адаптировано для использования на различных устройствах, а также обеспечивать поддержку светлой и тёмной тем.

В рамках модуля тестирования необходимо предусмотреть возможность создания заданий различных типов: с выбором одного правильного ответа, с множественным выбором, а также заданий открытого типа (с ручной проверкой или перспективой машинного анализа). Для каждого теста преподаватель должен иметь возможность задать структуру, количество попыток, уровень сложности, шкалу оценивания и порог прохождения. После прохождения теста обучающийся должен получить моментальный результат, сводную таблицу по своим ответам и доступ к предыдущим попыткам. Вся информация должна фиксироваться в базе данных с помощью хранимых процедур.

Система аналитики обязана поддерживать функции построения графиков и отчётов по результатам тестирования, в том числе: индивидуальный прогресс обучающегося, сравнение между классами, средние показатели по темам и тестам, а также прогноз успеваемости на основе динамики предыдущих попыток. Вся аналитика должна отображаться в удобной визуальной форме с применением средств динамической отрисовки, таких как Chart.js.

С технической точки зрения проект требует реализации клиент-серверной архитектуры с использованием HTML5, CSS3 (в том числе Bootstrap 5), JavaScript и PHP 8. На стороне сервера должны быть реализованы API-обработчики, обеспечивающие безопасный доступ к базе данных MySQL 8. Все операции с критическими данными (регистрация, вход, отправка сообщений, прохождение тестов, редактирование контента) должны сопровождаться средствами защиты от SQL-инъекций, подделки межсайтовых запросов, автоматического логирования действий пользователей и CAPTCHA при аутентификации.

Особое внимание в рамках технического задания уделяется проектированию базы данных. Требуется чёткая структура с нормализацией до третьей нормальной формы (3НФ), системой внешних ключей, оптимизированными индексами, поддержкой транзакций и хранимыми процедурами, реализующими основную бизнес-логику. Предусматривается наличие таких таблиц, как: пользователи, учебные материалы, тесты, вопросы, ответы, результаты, сообщения, логи действий. Для повышения надёжности система должна логировать каждое важное действие пользователя, включая вход в систему, изменение профиля, отправку сообщений и прохождение тестов.

Проектируемое приложение должно быть пригодным для повседневного использования в учебных учреждениях различного профиля, легко масштабироваться, поддерживать резервное копирование и быть устойчивым к типичным сбоям. Наличие административной панели с возможностью мониторинга состояния системы, анализа журналов активности и управления правами доступа — обязательный элемент системы.

Методика и архитектура решения. Разработка веб-приложения для автоматизации учебной деятельности проводилась на основе методологии структурного и объектно-ориентированного проектирования, с учётом принципов модульности, расширяемости и повторного использования компонентов. На всех этапах — от анализа требований до внедрения — использовались средства системного анализа, моделирования бизнес-процессов, прототипирования интерфейсов и итеративной разработки [3] (рис.1).

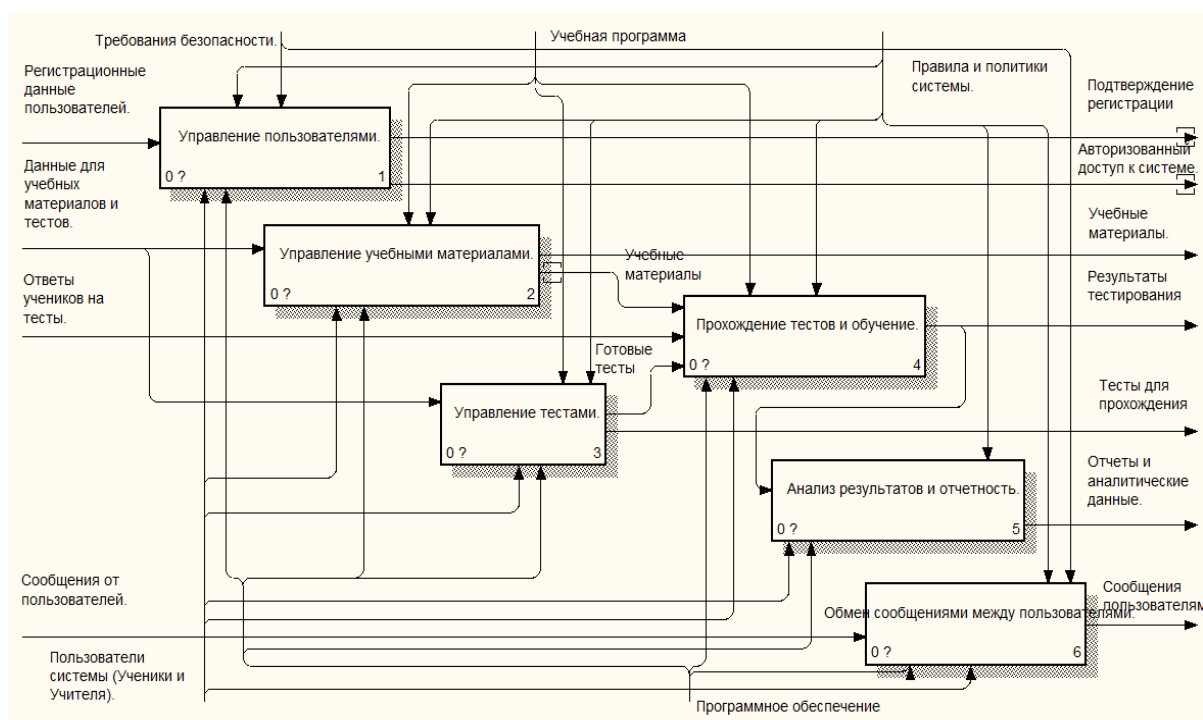


Рис. 1. Диаграмма декомпозиции

Основной методологический подход включал в себя:

- 1) анализ предметной области с построением контекстной и функциональной диаграмм (IDEF0),
- 2) проектирование реляционной базы данных,

3) реализацию серверной части с использованием языка PHP и системы управления базами данных MySQL,

4) разработку клиентской части с применением HTML5, CSS (в том числе Bootstrap 5), JavaScript и технологии AJAX,

5) внедрение хранимых процедур в целях централизации бизнес-логики и повышения безопасности.

С архитектурной точки зрения система построена по классической трёхуровневой модели:

Клиентский уровень реализует пользовательский интерфейс и обеспечивает интерактивное взаимодействие через браузер. Включает в себя формы регистрации, входа, панели преподавателя и учащегося, редакторы тестов и материалов, интерфейсы обмена сообщениями и отчётности. Все визуальные компоненты оформлены в едином стиле и адаптированы под различные устройства.

Серверный уровень отвечает за обработку запросов, валидацию данных, реализацию бизнес-логики и взаимодействие с базой данных. Все операции реализованы через модульную структуру PHP-файлов, сгруппированных по функциональным направлениям (аутентификация, тесты, материалы, сообщения и пр.).

Уровень хранения данных представлен СУБД MySQL. Структура базы данных охватывает основные сущности образовательного процесса: пользователи, классы, учебные материалы, тесты, результаты, сообщения и действия пользователей. Между таблицами реализованы связи с помощью внешних ключей, поддерживается нормализация до 3НФ [4].

Обработка всех ключевых действий — от регистрации и авторизации до анализа результатов тестирования — осуществляется через хранимые процедуры, что позволяет:

- 1) снизить нагрузку на клиентский и промежуточный код;
- 2) обеспечить контроль целостности данных;
- 3) повысить производительность за счёт выполнения логики непосредственно на стороне сервера базы данных;
- 4) централизовать защиту от SQL-инъекций и злоупотреблений правами доступа.

Для визуализации аналитических данных используется библиотека Chart.js, позволяющая строить графики успеваемости, сравнения классов, сложности тестов и прогнозов на основе накопленных данных. Логирование всех действий пользователей позволяет формировать прозрачную и контролируруемую образовательную среду.

Приложение разработано с поддержкой светлой и тёмной тем, наличием капчи, CSRF-защиты и возможности динамического обновления интерфейса без перезагрузки страниц. Адаптивная верстка обеспечивает корректную работу на устройствах с различным разрешением экрана, включая мобильные платформы.

Выбранная методика разработки и архитектура системы обеспечивают не только техническую устойчивость и безопасность приложения, но и его открытость к последующему масштабированию и адаптации под конкретные условия эксплуатации.

Проектирование базы данных. Одним из ключевых этапов разработки информационной системы является проектирование базы данных, обеспечивающей надёжное, структурированное и безопасное хранение всех компонентов учебной деятельности. Система управления базами данных (СУБД) MySQL была выбрана в качестве основы за счёт её стабильности, поддержки хранимых процедур, транзакционности и широкого распространения в сфере веб-разработки.

Концептуальное проектирование началось с анализа предметной области и выявления основных сущностей: пользователи, классы, учебные материалы, тесты, вопросы, ответы, результаты тестов, личные сообщения и журнал действий. Эти сущности легли в основу ER-модели, формализующей отношения между объектами системы и задающей структуру будущей базы [5].

На этапе логического проектирования была сформирована структура таблиц с указанием типов данных, связей и ограничений. Каждая таблица получила первичный ключ, большинство — внешние ключи, обеспечивающие целостность данных. Например, таблица *TestResults* связывает пользователей с тестами и хранит результаты прохождения, таблица *StudentAnswers* позволяет анализировать выбор конкретных ответов, а таблица *Messages* реализует двустороннюю асинхронную коммуникацию между участниками.

Физическое проектирование включало выбор оптимальных типов данных, создание индексов и реализацию хранимых процедур. Идентификаторы (ID) всех сущностей заданы как автоинкрементируемые поля типа INT, текстовые поля — в формате VARCHAR или TEXT, даты фиксируются с помощью DATETIME с автоматическим добавлением временной метки. Для повышения производительности созданы вторичные индексы по полям, активно используемым в запросах: *UserName*, *TestID*, *ClassID* (рис. 2).

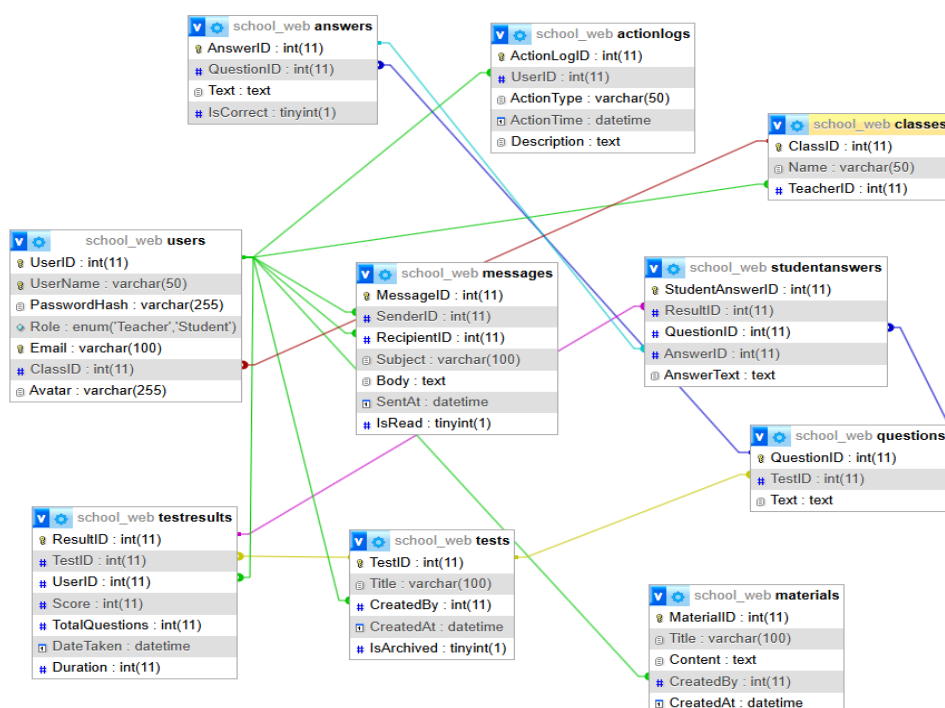


Рис. 2. Физическая модель базы данных

Особое внимание было уделено реализации бизнес-логики через хранимые процедуры, что позволило централизовать операции создания, модификации и анализа данных. В число таких процедур входят *RegisterUser*, *AuthenticateUser*, *CreateOrUpdateTest*, *SaveTestResult*, *LoadTestData*, *SendMessage*, *PredictStudentPerformance* и другие. Такой подход упрощает сопровождение кода, минимизирует риск SQL-инъекций и способствует повышению общей надёжности приложения.

Дополнительно в структуру базы включена таблица ActionLogs, фиксирующая действия пользователей: вход в систему, редактирование данных, отправку сообщений, прохождение тестов. Это не только повышает безопасность, но и создаёт основу для последующего аудита и формирования отчётности.

Функциональность веб-приложения. Разработанное веб-приложение представляет собой интегрированную информационную систему, реализующую ключевые процессы управления учебной деятельностью, основанную на технологии клиент-серверного взаимодействия. Система ориентирована на поддержку пользователей с различными ролями (обучающийся, преподаватель) и предоставляет каждому типу пользователя индивидуализированный набор функций.

Для преподавателя доступны следующие основные модули: создание и редактирование учебных материалов, формирование тестов, просмотр результатов, генерация отчётов, ведение диалогов с обучающимися, а также административный доступ к журналу действий пользователей. Учебные материалы оформляются в виде текстового контента с сохранением в базе данных и возможностью редактирования. Модуль тестирования включает функции задания названия теста, ввода вопросов с несколькими вариантами ответов и указания правильного, архивации устаревших заданий и загрузки их по запросу. Вся информация сохраняется через хранимые процедуры CreateOrUpdateTest, AddQuestionWithAnswers и SaveMaterial (рис. 3).

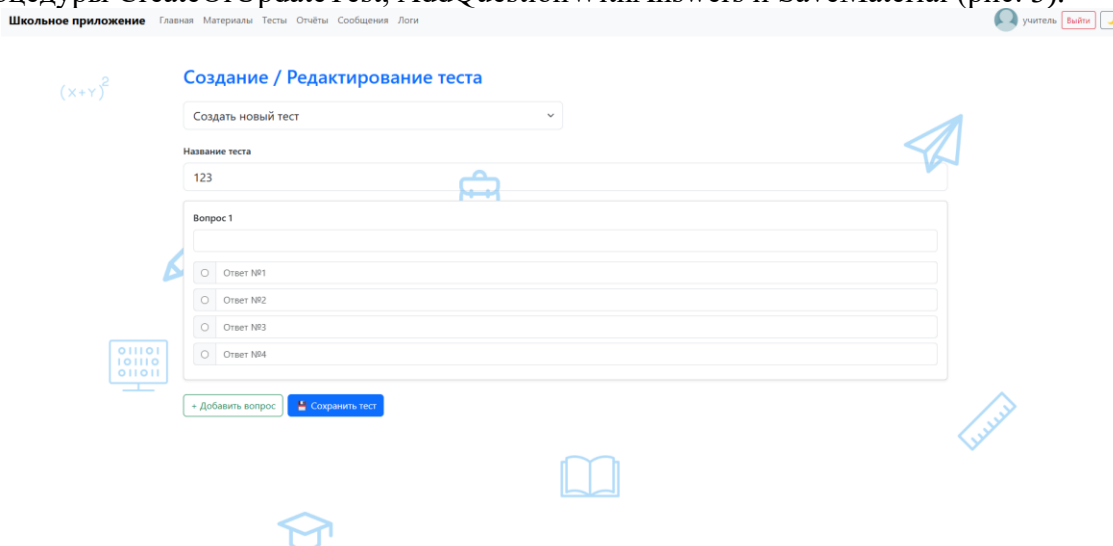


Рис. 3. Форма создания/редактирования тестов

Обучающийся получает доступ к списку учебных материалов, может просматривать их в адаптированном для чтения интерфейсе, проходить тесты и отслеживать свои достижения. После прохождения теста система автоматически подсчитывает результат, сохраняет его в базе данных (SaveTestResult) и отображает сводную таблицу в личном кабинете. Исключается необходимость ручной проверки заданий и снижается нагрузка на преподавателя.

Особое внимание уделено аналитическим функциям. Раздел «Отчёты» позволяет преподавателю сформировать графики и таблицы, отражающие успеваемость обучающихся, средние баллы по тестам, сравнение между классами, сложность заданий, а также построить прогноз по результатам конкретного ученика. Для реализации этой функциональности используются хранимые процедуры GetStudentPerformance, CompareClassScores, PredictStudentPerformance, с последующей визуализацией данных в виде графиков через библиотеку Chart.js (рис. 4).

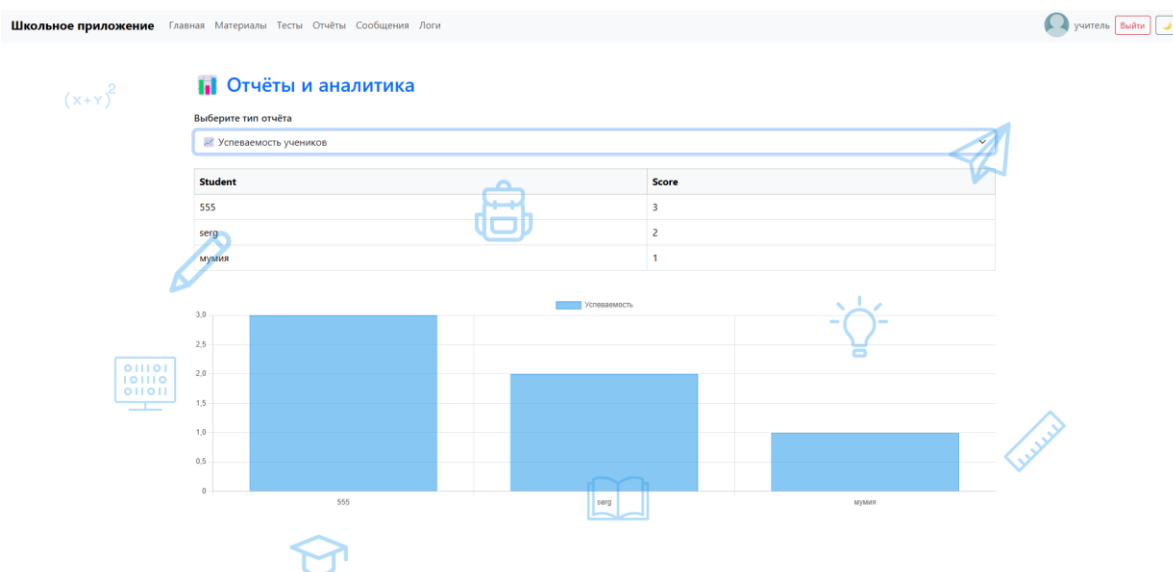


Рис. 4. Форма отчетов и аналитики

Модуль сообщений реализован в формате современных мессенджеров: с разделением переписок на диалоги, отображением аватаров, выравниванием сообщений по сторонам и возможностью поиска адресата с помощью автодополнения. Это позволяет обеспечить оперативную обратную связь между участниками образовательного процесса и расширяет коммуникационные возможности системы.

Для каждого действия, совершаемого пользователем, система инициирует логирование через процедуру LogAction, фиксируя дату, время, тип действия и его описание. Это обеспечивает прозрачность работы, а также служит инструментом последующего анализа и аудита.

Дополнительные возможности включают поддержку светлой и тёмной тем, динамического интерфейса с плавными анимациями и интерактивными элементами, загрузку и отображение пользовательских аватаров, адаптацию к мобильным устройствам, а также возможность печати учебных материалов и тестов.

Вся функциональность реализуется средствами PHP, JavaScript и Bootstrap, с применением AJAX-запросов для асинхронного взаимодействия с сервером. За счёт чёткой структуры, разграничения ролей, наличия аналитических модулей и открытости архитектуры приложение способно эффективно выполнять задачи автоматизации учебной деятельности как в школьной, так и в вузовской среде [6].

Анализ эффективности и апробации. Для оценки практической применимости разработанного веб-портала была проведена апробация в реальных условиях учебного процесса. Основными критериями эффективности выступали: удобство интерфейса для пользователей с разным уровнем цифровой грамотности, стабильность работы в локальной и сетевой среде, полнота реализованных функций, скорость отклика системы, а также простота сопровождения и расширяемость архитектуры.

В рамках тестирования были задействованы две основные пользовательские группы: преподаватели, взаимодействующие с интерфейсами создания и редактирования учебных материалов, тестов, генерации отчётов и переписки; и обучающиеся, проходящие тесты, просматривающие теоретические материалы и участвующие в диалоговом общении. Проведённая обратная связь позволила зафиксировать следующие результаты:

- 1) Интерфейс был признан интуитивно понятным более чем 90 % пользователей, благодаря чёткой структуре, адаптивному дизайну и тематическому оформлению;
- 2) Скорость загрузки ключевых страниц (материалы, тесты, отчёты) не превышала 0.5–1.2 секунд при работе на стандартных учебных компьютерах;
- 3) Корректность работы функционала по созданию, редактированию и прохождению тестов достигла 100 % при выполнении стандартных сценариев;
- 4) Устойчивость к нагрузке подтверждена при одновременной работе до 50 пользователей, что было достигнуто за счёт оптимизации базы данных и применения хранимых процедур;
- 5) Безопасность системы обеспечивалась через внедрение CAPTCHA, CSRF-защиты, разграничения прав доступа и логирования действий.

Результаты тестирования позволяют утверждать, что внедрение портала значительно упрощает повседневную работу преподавателя: время, затрачиваемое на организацию тестирования и обработку результатов, сокращается в среднем на 60–70 % по сравнению с ручными или полуавтоматическими методами. Кроме того, учащиеся получают возможность доступа к актуальным материалам и индивидуальной статистике в любое время, что повышает их вовлечённость и мотивацию к обучению.

Апробация подтвердила соответствие реализованной системы заявленным требованиям и её готовность к дальнейшему масштабированию. Система может быть успешно адаптирована под специфику как школьного, так и вузовского обучения, что подтверждает её универсальность и прикладную ценность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захарова И. Г. Информационные технологии в образовании: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений. / И. Г. Захарова. – Москва: Академия, 2003. – 192 с.
2. Белоконова, С. С. Web-технологии в профессиональной деятельности учителя: учебное пособие / С. С. Белоконова, В. В. Назарова. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 180 с.
3. Колисниченко Д. Н. PHP и MySQL. Разработка веб-приложений / Д. Н. Колисниченко. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 592 с.
4. Дакетт, Дж. PHP и MySQL. Серверная веб-разработка / Дж. Даккет. – пер. с англ. М. А. Райтмана. – Москва: Эксмо, 2023. – 688 с.
5. Маклафлин, Б. PHP и MySQL: исчерпывающее руководство / Б. Маклафлин. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 544 с.
6. Хоган, Б. HTML5 и CSS3: веб-разработка по стандартам нового поколения. / Б. Хоган. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2015. – 320 с.

Поступила в редакцию 02.09.2025 г., рекомендована к печати 22.09.2025 г.

APPLICATION OF MODERN WEB TECHNOLOGIES FOR AUTOMATING EDUCATIONAL ACTIVITIES: A CASE STUDY OF AN EDUCATIONAL PORTAL

Bondarenko V.I., Martynenko A-A.M., Pridvorov S.V.

This paper explores the application of modern web technologies to automate various aspects of educational activities through the development of a dynamic web-based application. The study presents an overview of existing solutions and highlights their limitations. A custom-built system is introduced, offering modules for user authentication, test management, learning material distribution, messaging, data visualization, and reporting. The solution is implemented using PHP, MySQL, JavaScript, and Bootstrap 5. Special attention is given to stored procedures, logging mechanisms, and an adaptive user interface.

Keywords: web application, automation, education, PHP, MySQL, Bootstrap, testing, reporting, messaging, database.

Бондаренко Виталий Иванович

кандидат технических наук, доцент, профессор
кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: bondarenko@donnu.ru

Bondarenko Vitaliy Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Professor at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Мартыненко Анастасия-Анна Михайловна

доцент кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: a.martinenko@donnu.ru

Martynenko Anastasiia-Anna Mikhailovna

Associate Professor at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Придворов Сергей Владимирович

студент кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pridvorovsergey@yandex.ru

Pridvorov Sergey Vladimirovich

Student at Department of Computer Technologies
of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОГО МЕТОДА ЛЯПУНОВА ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ И НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ АССОЦИАТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА

© 2025 *Васильев П.В., Даринцев О.В., Мунасыпов Р.А.*

Статья посвящена решению актуальной проблемы анализа устойчивости систем автоматического управления, использующих регуляторы на основе ассоциативной памяти. Такие регуляторы, являясь по своей природе нелинейными и адаптивными, требуют специализированных подходов к анализу их влияния на динамику замкнутой системы. Результаты исследования дают аналитические условия для обеспечения локальной устойчивости системы и демонстрируют методический подход к использованию поверхностей уровня функции

Ключевые слова: ассоциативный регулятор, управление, прямой метод Ляпунова, нелинейность, гармоническая линеаризация.

Введение. Автоматическое управление играет ключевую роль в современном техническом прогрессе, обеспечивая безопасность, эффективность и качество функционирования сложных технических систем. В то время как традиционные методы линейного управления успешно применяются к системам с линейной динамикой, реальные объекты часто характеризуются нелинейностями и неопределенностями, что требует применения более совершенных стратегий управления [1-5]. Регуляторы на основе ассоциативной памяти, относящиеся к классу интеллектуальных систем управления [6-10], представляют собой перспективный подход для работы с такими сложными объектами благодаря их способности к обучению, адаптации и аппроксимации сложных нелинейных зависимостей [11].

Однако, будучи по своей сути нелинейными системами, ассоциативные регуляторы вносят нелинейность в замкнутый контур управления, что усложняет анализ устойчивости [2]. Поведение замкнутой системы может стать сложным, с возможностью возникновения бифуркаций или колебаний, особенно при изменении режимов работы или параметров объекта [12]. Классические методы анализа устойчивости линейных систем здесь неприменимы напрямую. Прямой метод Ляпунова является одним из наиболее точных и фундаментальных инструментов для анализа устойчивости нелинейных систем [1]. Он позволяет исследовать устойчивость, не требуя явного решения дифференциальных уравнений системы.

Гипотеза заключается в том, что прямой метод Ляпунова, дополненный методом гармонической линеаризации для аппроксимации нелинейной характеристики ассоциативного регулятора, позволяет не только провести анализ устойчивости замкнутой системы, но и сформулировать практические условия и рекомендации, связывающие эффективное поведение ассоциативного регулятора с обеспечением асимптотической устойчивости системы в окрестности точки равновесия.

Целью данной работы является демонстрация методики применения прямого метода Ляпунова для получения условий устойчивости и оценки рабочих диапазонов системы управления, состоящей из ассоциативного регулятора и линейной части.

Задачи исследования:

1. Построить математическую модель замкнутой системы управления в пространстве состояний, включающую ассоциативный регулятор.
2. Применить метод гармонической линеаризации для представления эффективного поведения ассоциативного регулятора в квазилинейной форме с параметрами q и q' .
3. Выбрать подходящую функцию Ляпунова $V(x) = x^T P x$ и получить выражение для ее производной по времени.
4. Вывести аналитические условия устойчивости линеаризованной системы, используя критерий Рауса-Гурвица, и связать их с параметрами гармонической линеаризации q и q' .
5. Показать, как функция Ляпунова и ее уровни могут быть использованы для оценки области притяжения и допустимых диапазонов изменения переменных состояния для системы с ассоциативным регулятором.

Актуальность темы обусловлена как широким распространением сложных нелинейных объектов управления, так и растущим интересом к интеллектуальным системам управления, включая регуляторы на основе ассоциативной памяти [5, 6, 10, 12, 13]. Разработка понятных и обоснованных методов анализа устойчивости таких систем имеет важное теоретическое и практическое значение. Предлагаемый подход стремится предоставить инструмент для оценки устойчивости и предварительной настройки ассоциативных регуляторов на основе классической теории устойчивости.

Описание объекта исследования и постановка задачи. Рассмотрим общую структурную схему САУ показанную на рисунке 1 и состоящую из:

1. Линейной части, которая состоит из исполнительного механизма, объекта управления и описывается эквивалентной передаточной функцией $W(s)$. Предполагается, что объект является управляемым и наблюдаемым.
2. Нелинейного регулятора на основе ассоциативной памяти, характеризуемого нелинейной функцией F :

$$u = F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (1)$$

где u – управляющее воздействие, ε – ошибка управления, $\dot{\varepsilon}$ – производная ошибки по времени.

3. Отрицательной обратной связи, с помощью которой сигнал ошибки формируется как:

$$\varepsilon = g - y,$$

где g – задающее воздействие, y – выходной сигнал объекта.

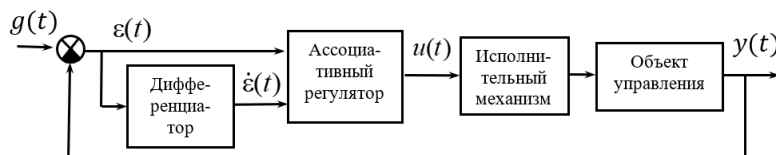


Рис. 1. Общая структурная схема системы с ассоциативным регулятором

Для анализа устойчивости положения равновесия рассматривается случай $g = 0$, следовательно:

$$\varepsilon = -y. \quad (2)$$

Пусть передаточная функция линейной части соответствует дифференциальному уравнению, которое связывает выход y и вход u :

$$D(s)y = N(s)u,$$

где $s = d/dt$ – оператор дифференцирования, $D(s)$ и $N(s)$ – полиномиальные операторы.

Используя (1) и (2), получаем дифференциальное уравнение замкнутой системы относительно ошибки ε :

$$\begin{aligned} D(s)(-\varepsilon) &= N(s)F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \\ -D(s)\varepsilon &= N(s)F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \end{aligned}.$$

Введем вектор состояния:

$$\begin{aligned} x_1 &= \varepsilon \\ x_2 &= \dot{\varepsilon} = \dot{x}_1 \\ &\vdots \\ x_n &= \varepsilon^{(n-1)} = \dot{x}_{(n-1)} \end{aligned}.$$

Подстановка этих переменных в дифференциальное уравнение замкнутой системы позволяет свести его к системе уравнений первого порядка вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{(n-1)} &= x_n \\ \dot{x}_n &= \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n, F(x_1, x_2)) \end{aligned}.$$

В общем случае, если линейная часть, описывающая динамику ошибки, может быть приведена к канонической форме управляемости или наблюдаемости, система записывается в матричной форме. Для простоты, предположим, что система может быть представлена в виде:

$$\dot{x} = Ax + BF(x_1, x_2), \quad (3)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$, A – матрица динамики линейной части системы (размера $n \times n$), B – вектор-столбец управления (размера $n \times 1$).

Задача состоит в том, чтобы, используя прямой метод Ляпунова и гармоническую линеаризацию, вывести условия для эффективных характеристик ассоциативного регулятора $F(x_1, x_2)$, обеспечивающие асимптотическую устойчивость замкнутой системы (3) в окрестности равновесия.

Гармоническая линеаризация. Для упрощения анализа используем метод гармонической линеаризации [14-18]. Предполагаем, что при определенных режимах работы, например, при предельных циклах или при анализе устойчивости к малым возмущениям, сигналы в системе близки к гармоническим. Тогда нелинейную функцию:

$$F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = F(x_1, x_2),$$

можно аппроксимировать линейной комбинацией ее входов с эквивалентными коэффициентами усиления q и $\dot{q}$:

$$F(x_1, x_2) \approx qx_1 + \dot{q}x_2. \quad (4)$$

Коэффициенты гармонической линеаризации q и $\dot{q}$ в общем случае зависят от амплитуды A и частоты ω входного сигнала $x_1(t)$, но для анализа локальной устойчивости их можно рассматривать как квазипостоянные параметры, характеризующие поведение нелинейности в окрестности рабочей точки.

Анализ устойчивости линеаризованной системы. Подставляя линеаризованное выражение ассоциативного регулятора (4) в исходную модель состояния (3), получаем линеаризованную систему:

$$\dot{x} \approx Ax + B(qx_1 + \dot{q}x_2). \quad (5)$$

Запишем $qx_1 + \dot{q}x_2$ в выражении (5) в виде матрицы-строки, которая в нашем случае имеет вид $[q, \dot{q}, 0, \dots, 0]$.

$$\dot{x} \approx (A + B[q, \dot{q}, 0, \dots, 0])x.$$

Обозначим матрицу линеаризованной замкнутой системы как A_3 :

$$A_3 = A + B[q, \dot{q}, 0, \dots, 0].$$

Теперь анализ устойчивости сводится к анализу линейной системы:

$$\dot{x} = A_3 x. \quad (6)$$

Система будет асимптотически устойчива, если и только если все собственные значения матрицы A_3 имеют отрицательные вещественные части т.е. является Гурвицевой.

Для анализа нелинейной системы с функцией Ляпунова, матрица P обычно выбирается из уравнения Ляпунова для некоторой стабильной линейной системы. Возьмем P как:

$$A_3^T P + P A_3 = -Q, \quad (7)$$

где Q - положительно определена ($Q=I$).

Если условия устойчивости для (7) выполняются, такое $P>0$ существует.

Прямой Метод Ляпунова. Для анализа устойчивости решения системы (3) при $g=0$ определим функцию Ляпунова $V(x)$. Для нахождения функции Ляпунова [13] возьмем ее как квадратичную форму от координат состояния линейной части системы плюс интеграл от нелинейности:

$$V(x) = x^T P x + \int_0^\sigma f(\sigma) d\sigma = C, \quad (8)$$

где P – симметричная ($P = P^T$) положительно определенная ($P>0$) матрица размера $n \times n$, $F(\sigma)$ –интегральная часть от нелинейности.

Производную функции $V(x)$ по времени вдоль траекторий системы вычислим по формуле (8). Производная квадратичной формы:

$$\begin{aligned} V'(x) &= \frac{dV}{dt} = (2Px)^T (Ax + BF(x_1, x_2)) \\ V'(x) &= 2x^T P (Ax + BF(x_1, x_2)) \\ V'(x) &= 2x^T P Ax + 2x^T P BF(x_1, x_2) \\ V'(x) &= x^T (A^T P + P A)x + 2x^T P BF(x_1, x_2) \end{aligned}$$

Производную интегральной части найдем, используя обобщенное правило Лейбница для дифференцирования интеграла с переменными пределами и подынтегральной функцией:

$$\frac{d}{dt} \int_0^{x_1} f(\sigma) d\sigma = F(x_1, x_2)x_2 + x_3 \int_0^{x_1} \frac{\partial F}{\partial x_2}(\sigma, x_2) d\sigma, \quad (9)$$

Тогда учетом (7) и (8) получим полную производную:

$$\begin{aligned} V'(x) = & x^T (A^T P + PA)x + 2x^T PBF(x_1, x_2) + \\ & + F(x_1, x_2)x_2 + x_3 \int_0^{x_1} \frac{\partial F}{\partial x_2}(\sigma, x_2) d\sigma \end{aligned} \quad (10)$$

Оценка диапазонов работы с помощью уровней функции Ляпунова. Если найдена матрица $P > 0$, и нелинейная функция линеаризована то уравнение (10), при $C > 0$ определяет эллипсоид в пространстве состояний. Если внутри этого эллипсоида производная $V'(x)$ отрицательно определена, то все траектории, начинающиеся внутри, останутся внутри и будут стремиться к $x=0$. Граница $V(x) = C$ может использоваться для оценки максимальных отклонений переменных состояния x_1, x_2 т.е. ошибки ε , скорости ошибки $\dot{\varepsilon}$ в области притяжения.

Для положительно определенной матрицы P , минимальное собственное значение $\lambda_{\min}(P)$ связано с минимальным "расширением" эллипсоида уровня $V(x) = \text{const}$. Мы знаем, что для любого $x \neq 0$,

$$\lambda_{\min}(P) \leq \frac{x^T P x}{x^T x},$$

Таким образом, если уравнение (9) равно C то:

$$\lambda_{\min}(P_{ii}) \leq \frac{C}{\|x\|^2}.$$

Поскольку:

$$x_i^2 = \|x_i\|^2,$$

то

$$x_i^2 \leq \frac{C}{\lambda_{\min}(P_{ii})},$$

или

$$|x_i| \leq \sqrt{\frac{C}{\lambda_{\min}(P_{ii})}}. \quad (11)$$

Диапазон выходного сигнала ассоциативного регулятора $u = F(x_1, x_2)$ может быть определён на основе найденных диапазонов x_1, x_2 и функции F .

Используя линеаризацию (4) для оценки диапазона u тогда:

$$u \approx qx_1 + \dot{q}x_2. \quad (12)$$

Используя диапазоны для x_1 и x_2 из (11) и подставляя в (12) получаем:

$$|u| \approx |q| \sqrt{\frac{C}{\lambda_{\min}(P_{ii})}} + |\dot{q}| \sqrt{\frac{C}{\lambda_{\min}(P_{ii})}}. \quad (13)$$

В результате, формулы (11) и (13) отображают максимальные и минимальные значения компонент вектора состояния x_i на границе $V(x) = C$, дают оценку допустимых диапазонов работы системы, при которых гарантируется возвращение к состоянию равновесия.

Результаты. Продемонстрируем работоспособность метода на примере. Допустим есть исполнительный механизм и объект управления с эквивалентной функцией:

$$W(s) = \frac{1}{(s^3 + 6s^2 + s)}. \quad (14)$$

График переходного процесса без регулятора, показан на рисунке 2.

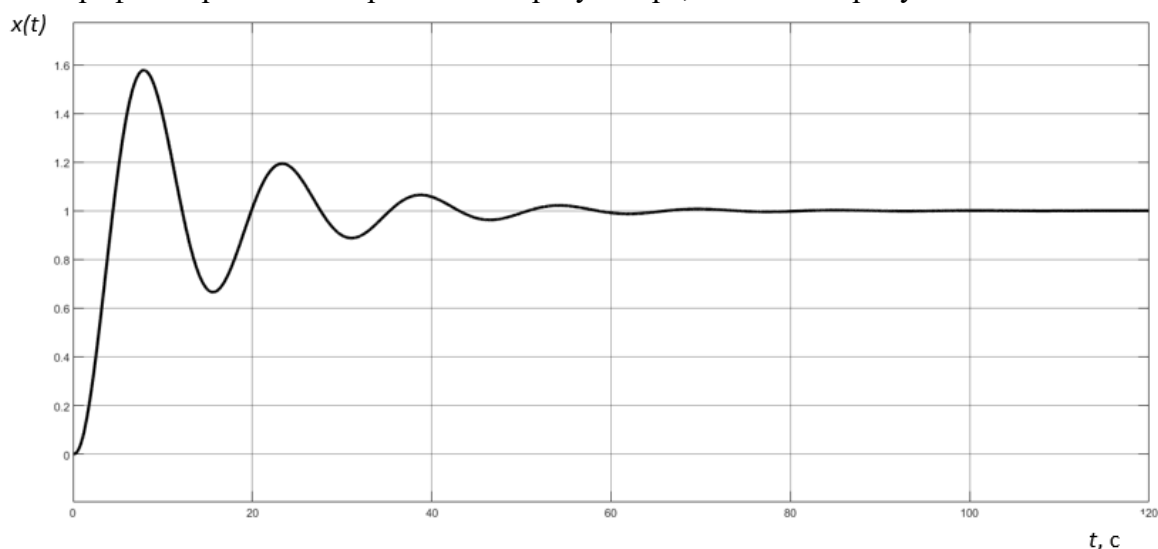


Рис. 2. График переходного процесса без регулятора

Как видно график переходного процесса занимает ~ 60 секунд и имеет перерегулирование $\sim 60\%$, что для современных систем управления является очень большими значениями.

Замкнутая система с ассоциативным регулятором, линеаризованным как $F(x_1, x_2) \approx qx_1 + \dot{q}x_2$ с матрицей $A_3 = A + B[q, \dot{q}, 0]$, имеет вид (6). Для передаточной функции (14), стандартный выбор переменных состояния $x_1 = \varepsilon$, $x_2 = \dot{\varepsilon}$ и модель (3) приводят к:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -6 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда:

$$A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -q & -(1+\dot{q}) & -6 \end{pmatrix}.$$

Характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет вид:

$$\det = sI - A_3 = s^3 + 6s^2 + (1 + \dot{q})s + q = 0.$$

Применяя критерий Рауса-Гурвица для полинома 3-го порядка получим:

$$1. a_i > 0: 1 > 0, 6 > 0, 1 + \dot{q} > 0, q > 0$$

$$2. a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0: 6(1 + \dot{q}) - 1q > 0$$

Итоговые условия устойчивости линеаризованной системы:

$$q > 0, \dot{q} > -1, q < 6 + 6\dot{q}. \quad (15)$$

Для соблюдения условий (15) возьмем $q \approx 12,5$, $\dot{q} \approx 36,5$, которые были получены опытным путем с помощью гармонической линеаризации ассоциативного регулятора с входным значением амплитуды равной 1.

Матрицу P вычислим, с учётом коэффициентов $q, \dot{q}$ выбранных выше, в программном обеспечении (ПО) MATLAB/Simulink с помощью команды *laur* (). В результате получим:

$$P = \begin{pmatrix} \frac{32}{2} & 3 & \frac{1}{6} \\ 3 & \frac{149}{6} & \frac{7}{2} \\ \frac{1}{6} & \frac{7}{2} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}.$$

Для вычисления диапазона по формуле (13) примем $C = 7$

$$|x_1| \leq 0,81, |x_2| \leq 0,53,$$

и подставив (14) с учетом коэффициентов q, q' , получим:

$$|u| \approx 12,5 \cdot 0,81 + 36,5 \cdot 0,53 = 29,47.$$

Ассоциативный регулятор выполняет поиск паттерна с минимальным значением при помощи формулы Евклидова расстояния [19, 20]:

$$B_i = \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2}.$$

где x_i – значение в ячейке ассоциативной памяти,

y_i – значение входного сигнала.

Далее управляющий сигнал определяется по найденному паттерну и выводится на исполнительное устройство.

Схема согласно рисунку 1 в ПО MATLAB/Simulink представлена на рисунке 3.

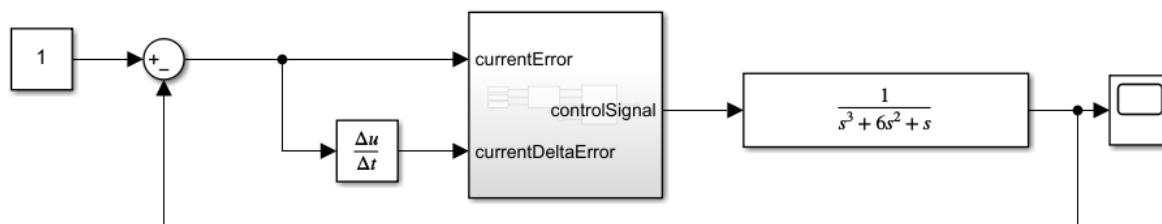


Рис. 3. Структурная схема в ПО MATLAB/Simulink

Подставив вычисленные по формулам (11) и (13) значения ошибки, скорости ошибки и выходного сигнала, как показано на рисунке 4 в блоки *error*, *error_rate*, *output* ассоциативного регулятора, мы получим график переходного процесса как показан на рисунке 5.

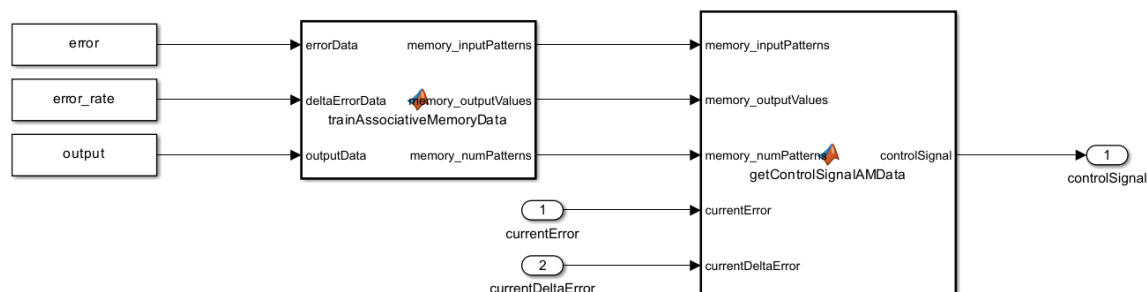


Рис. 4. Подстановка значений в ассоциативный регулятор

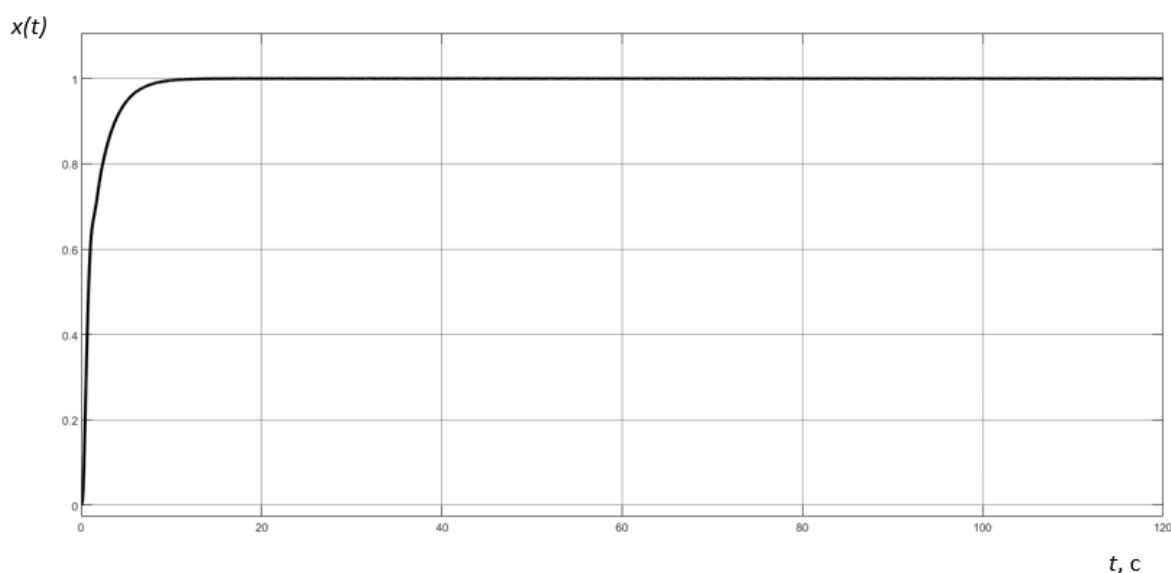


Рис. 5. График переходного процесса системы с ассоциативным регулятором

Как видно из рисунка 5, переходный процесс системы с ассоциативным регулятором демонстрирует высокое качество: быстрое достижение установившегося значения практически без перерегулирования, что подтверждает эффективность регулятора и адекватность выбранных настроек.

Вывод. В работе продемонстрирован подход к анализу устойчивости системы управления, использующей регулятор на основе ассоциативной памяти. Методология базируется на применении прямого метода Ляпунова в сочетании с гармонической линеаризацией нелинейного поведения ассоциативного регулятора.

Основные результаты:

1. Построена модель системы в пространстве состояний и определена структура линеаризованной системы.
2. Получены аналитические условия асимптотической устойчивости для линеаризованной модели, связывающие устойчивость с эффективными коэффициентами гармонической линеаризации q , $\dot{q}$ ассоциативного регулятора.

3. Продемонстрирована процедура нахождения матрицы P квадратичной функции Ляпунова из уравнения Ляпунова для устойчивой линеаризованной системы.

4. Показано, как уровни функции Ляпунова могут быть использованы для оценки области притяжения и допустимых диапазонов ошибки управления ε , ее производной $\dot{\varepsilon}$ и выходного сигнала регулятора u .

5. Приведенный пример расчетов и моделирования показал соответствие теоретических условий устойчивости и оценок диапазонов с практическими результатами работы системы с ассоциативным регулятором, демонстрирующей высокое качество управления.

Данный подход предоставляет инженерам и исследователям инструмент для предварительного анализа и настройки ассоциативных регуляторов. Условия на q и $\dot{q}$ задают требования к эффективному поведению ассоциативной памяти в рабочем режиме для обеспечения устойчивости системы. Хотя гармоническая линеаризация является приближенным методом, она дает ценные качественные и количественные оценки, особенно на этапе проектирования и начальной настройки регулятора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 440 с. – ISBN 978-5-9221-0858-4.
2. Евстафьева, В. В. Синтез управления возмущенной системой с неоднозначной нелинейностью / В. В. Евстафьева // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 3. – С. 44-64. – DOI 10.31857/S0005231023030030.
3. Хамитов, Р. Н. Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики посредством программного пакета MATLAB SIMULINK / Р. Н. Хамитов, П. В. Зыкин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 145-152. – DOI 10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152.
4. Zhou, M. Tracking Control of High-Order Nonlinear Systems With Unknown Control Gains and Its Application: An Adaptive Fuzzy Control Method / M. Zhou, F. Yang, X. Deng // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 141211-141223. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3467112.
5. Емельянов, А. М. Синтез нейросетевого регулятора для автоматизированной системы управления каскадом центробежных экстракторов / А. М. Емельянов, Ю. М. Козлова, И. С. Надеждин // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2024. – № 1-1. – С. 320-322.
6. Маршаков, Д. В. Извлечение правил нейросетевого регулятора при построении когнитивных систем автоматического управления / Д. В. Маршаков, О. Л. Цветкова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 1. – С. 62-76. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2024/1/62-76.
7. Command Filter-Based Adaptive Fuzzy Finite-Time Tracking Control for Uncertain Fractional-Order Nonlinear Systems/ X. You [et al.] // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2023. – Vol. 31(1) – P. 226-240. – DOI 10.1109/TFUZZ.2022.3185453.
8. Ye, Y. Adaptive neural network control for uncertain strict-feedback nonlinear systems with unknown control coefficients: A fully actuated system approach/ Y. Ye, D. Fan, X. Zhang // 2024 3rd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications. – 2024. – P. 915-920. – DOI 10.1109/FASTA61401.2024.10595224.
9. Огнев, И. В. Ассоциативные память, среды, системы / И. В. Огнев, В. В. Борисов, Н. А. Сутула. – М.: Горячая линия-Телеком, 2016. – 420 с. – ISBN 978-5-9912-0602-9.
10. Khapkin, D. Methodology of Synthesis of Tracking Neural Network Control Systems for Objects with Limiters / D. Khapkin, S. Feofilov, A. Kozyr // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. – 2023. – P. 258-262. – DOI 10.1109/SUMMA60232.2023.10349576.
11. Optimal Elevators Control for Buildings Based on Associative Memory / S.R. Ahmed [et al.] // 2024 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS). – IEEE, 2024. – P. 1-8. – DOI 10.1109/ISAS64331.2024.10845288.

12. Гайдук, А. Р. Синтез нелинейных дискретных систем управления методом квазилинейной дискретизации / А. Р. Гайдук, В. С. Плаксиенко, С. Г. Капустян // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 2. – С. 7-11. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_2_07.
13. Robust nonlinear optimal control via system level synthesis/ A.P. Leeman [et al.] //IEEE Transactions on Automatic Control. – 2025. – P. 1-8. – DOI 10.1109/TAC.2025.3552482.
14. New trajectory linearization control for nonlinear systems undergoing harmonic disturbance/ Z. Liang, C. Li, J. Zhongliang, H. Shiqiang //Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2009. – Vol. 20. – №. 3. – P. 571-576.
15. Stability analysis of single-phase grid-feeding inverters with PLL using Harmonic Linearisation and Linear Time Periodic (LTP) theory/ V. Salis, A. Costabeber, P. Zanchetta, S. Cox // 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. – 2016. – P. 1-7. – DOI 10.1109/COMPEL.2016.7556694.
16. Лазаренко, С. В. синтез интеллектуальных управлений лагранжевыми системами на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче / С. В. Лазаренко // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 201-211. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-201-211.
17. Robust torque control for induction motor drives using fuzzy and pid control / M. A. Dashtaki [et al.] // 2023 33rd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). – 2023. – P. 1-5. – DOI 10.1109/AUPEC59354.2023.10502571.
18. Devyatov, M. Structural Classification of Phase Space Projections with Neural Network-Based Optimization of Sliding Mode Existence Regions for Automated Control System Synthesis / M. Devyatov, V. Telezhkin, P. Ugarov // 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – IEEE, 2025. – P. 1104-1110. – DOI 10.1109/SmartIndustryCon65166.2025.10986125.
19. Васильев, П. В. Сравнительный анализ нечеткой логики и ассоциативной памяти в задачах интеллектуального управления / П. В. Васильев, О. В. Даринцев, Р. А. Мунасыпов // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: электронное издание, Железногорск, 30 ноября 2024 года. – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2024. – С. 159-163.
20. Мунасыпов, Р.А. Алгоритм создания и настройки поверхности управления для регулятора на основе ассоциативной памяти / Р. А. Мунасыпов, О. В. Даринцев, П. В. Васильев // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 12–13 ноября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 62-67.

Поступила в редакцию 03.09.2025 г., рекомендована к печати 25.09.2025 г.

THE USE OF THE DIRECT LYAPUNOV METHOD FOR STABILITY ANALYSIS AND
PARAMETER SETTING OF THE ASSOCIATIVE REGULATOR

Vasilev P.V., Darintsev O.V., Munasypov R.A.

The article is devoted to solving the urgent problem of analyzing the stability of automatic control systems using regulators based on associative memory. Such regulators, being nonlinear and adaptive in nature, require specialized approaches to the analysis of their influence on the dynamics of a closed system. The results of the study provide analytical conditions for ensuring the local stability of the system and demonstrate a methodical approach to using the surfaces of the level of the Lyapunov function to determine the operating ranges.

Keywords: associative regulator, control, direct Lyapunov method, nonlinearity, harmonic linearization.

Васильев Павел Валерьевич

аспирант Института механики им. Р.Р. Мавлютова
ФГБНУ «Уфимский федеральный
исследовательский центр РАН»,
ассистент кафедры автоматизации
технологических процессов ФГБОУ ВО
«Уфимский университет науки и технологий»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан,
г. Уфа.
E-mail: pavel-vasilev-99@bk.ru

Vasilev Pavel Valerevich

Postgraduate student at Mavlyutov Institute of
Mechanics UFRC RAS,
Assistant at Department of Automation of
Technological Processes of the Ufa University of
Science and Technology,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Ufa.

Даринцев Олег Владимирович

доктор технических наук, доцент, и.о.
заведующего кафедрой механики и цифрового
проектирования ФГБОУ ВО «Уфимский
университет науки и технологий»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан,
г. Уфа.
E-mail: oleg_sam@mail.ru

Darintsev Oleg Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Acting Head of the Department of Mechanics and
Digital Design of the Ufa University of Science and
Technology,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Ufa.

Мунасыпов Рустэм Анварович

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой автоматизации технологических
процессов ФГБОУ ВО «Уфимский университет
науки и технологий»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан,
г. Уфа.
E-mail: rust40@mail.ru

Munasypov Rustem Anvarovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
Department of Automation of Technological
Processes of the Ufa University of Science and
Technology,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Ufa.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ БАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2025 *Сорокин А.И., Курносов В.Г.*

В данной работе приведена разработка структурной схемы базы пространственных данных ограниченного пространства на основе данных пространственного сканирования, полученных с помощью камеры глубины. Рассмотрена концептуальная модель базы пространственных данных для информационного моделирования ограниченных пространств подземных выработок шахт, промышленных предприятий, зданий и сооружений. Рассмотрена структура входных и выходных данных. Разработана структурная схема базы данных в виде модели «сущность-связь».

Ключевые слова: структурная схема, база пространственных данных, ограниченное пространство, фотоизображение, трехмерная модель, камера глубины, ER-диаграмма.

Введение. Сбор, обработка и хранение пространственных данных является актуальной задачей исследований в области информационных технологий. В частности, данные пространственного сканирования подземных горных выработок, объектов социального и инфраструктурного назначения, заводов могут использоваться для создания горно-геологических информационных систем, систем информационного моделирования зданий, цифровых двойников промышленных предприятий.

Основным способом пространственного сканирования на данный момент является наземное лазерное сканирование. Вместе с тем, все большее развитие получает использование методов пространственного сканирования, основанных на применении камер глубины. Камеры глубины обеспечивают создание трёхмерных моделей объектов при существенно меньших затратах по сравнению с технологией наземного лазерного сканирования. В данной работе рассматривается разработка структурной схемы базы пространственных данных ограниченного пространства (далее – базы данных) на основе данных, полученных с помощью камеры глубины.

Под базой пространственных данных понимается совокупность пространственных данных, организованных по определенным правилам, которые устанавливают общие принципы описания, хранения и манипулирования данными, и используемая для удовлетворения информационных потребностей пользователя [1]. Под ограниченными пространствами в данной работе подразумеваются искусственно или естественно созданные пространства, ограниченные со всех сторон, характеризующиеся отсутствием непосредственного контакта с внешней средой. К таким пространствам относятся внутреннее пространство производственных помещений, складов, подземных сооружений, подземных выработок шахт. Также к ним можно отнести ограниченные и замкнутые пространства согласно [2], к которым относятся ограниченные объекты, не предназначенные для постоянного пребывания человека: водостоки, коллекторы сточных вод, отстойники, амбары, колодцы и т.д.

Таким образом, разработка базы данных позволит организовать пространственные данные ограниченных пространств разного назначения по определенным правилам, установить принципы хранения и манипулирования данными для применения в информационных системах моделирования зданий, цифровых двойниках промышленных предприятий, горно-геологических информационных системах.

Основная часть. Входными данными базы данных являются серии снимков, полученные с помощью камеры глубины, а также координаты и углы вращения снимков. Под серией снимков в данной работе подразумевается последовательный набор снимков, полученных с помощью одной камеры глубины за один цикл съемки. Каждый снимок, полученный камерой глубины, состоит из фотоизображения и карты глубины. Пиксели фотоизображения характеризуют цвет точки объекта, а пиксели карты глубины – расстояние от точки объекта до плоскости камеры. Координаты и углы вращения снимка характеризуют пространственное положение и ориентацию камеры в момент съемки. Данные пространственного положения и ориентации камеры для каждого снимка могут быть получены различными способами. Существуют как прямые методы (использование системы позиционирования и ориентации камеры), так и косвенные (вычисление положения камеры с помощью специальных меток или взаимное ориентирование снимков на основе алгоритмов фотограмметрии), но в данной работе они не рассматриваются. Предполагается, что эти данные уже известны и являются входными данными. Помимо этого, каждый снимок характеризуется параметрами камеры, с помощью которой он был получен, а также датой и временем.

В качестве иллюстрации входных данных рассмотрим результат разреженной трехмерной реконструкции ограниченного пространства на основе серии снимков на рис. 1.

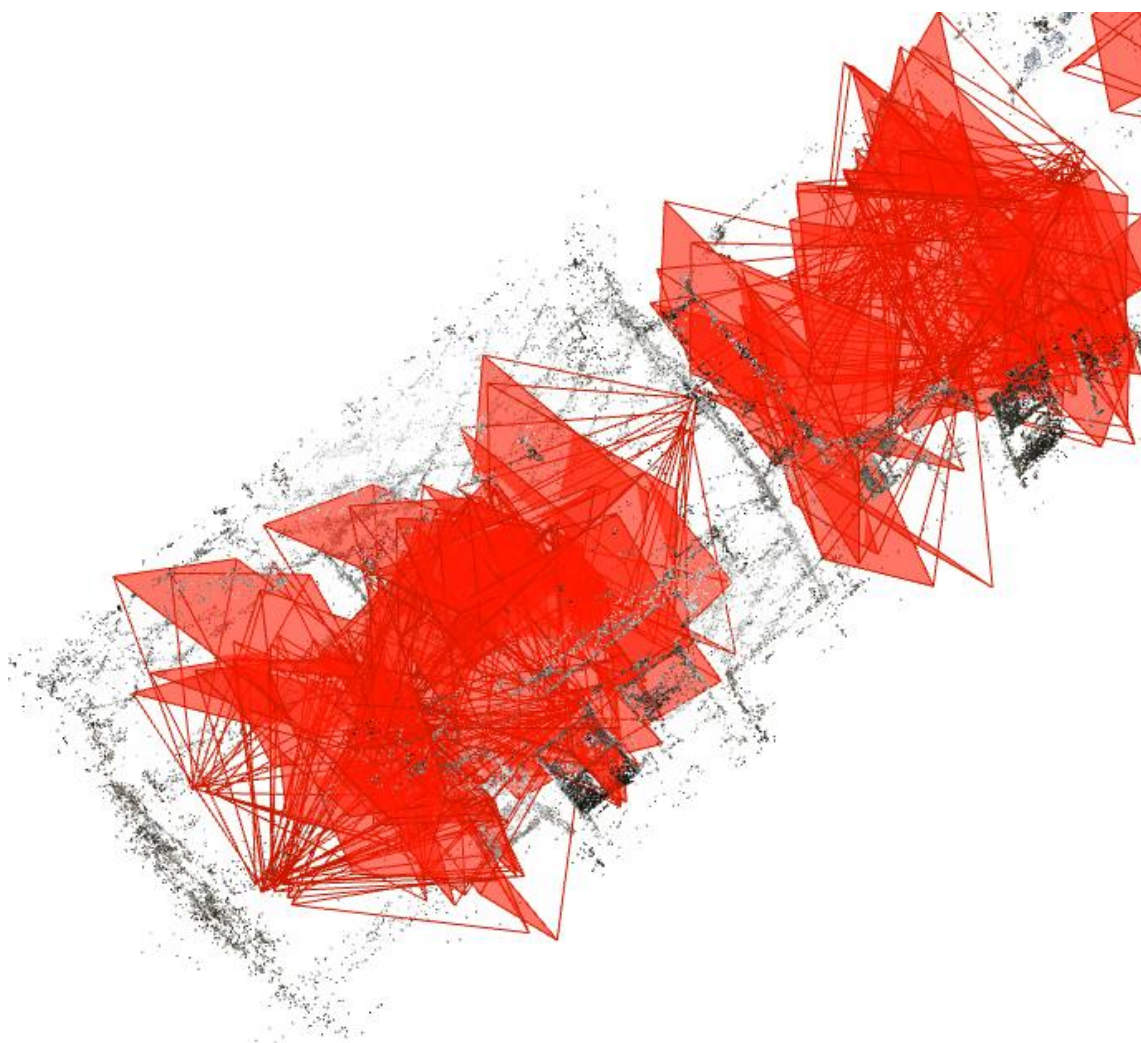


Рис. 1. Разреженная трехмерная реконструкция ограниченного пространства на основе серии снимков

Внутри ограниченного пространства мы можем наблюдать серию снимков, которые визуализированы в виде четырехугольных пирамид с прозрачными боковыми гранями, основание которых закрашено. Вершиной отдельной пирамиды является положение камеры в момент съемки, прозрачные боковые грани характеризуют направление и ракурс, а закрашенное основание в виде прямоугольника соответствует плоскости снимка. Таким образом, координаты снимка характеризуют пространственное положение камеры в момент съемки, а углы вращения определяют, какую часть внутренней поверхности ограниченного пространства охватывает снимок.

На рис. 2 представлена структурная схема входных данных базы данных.

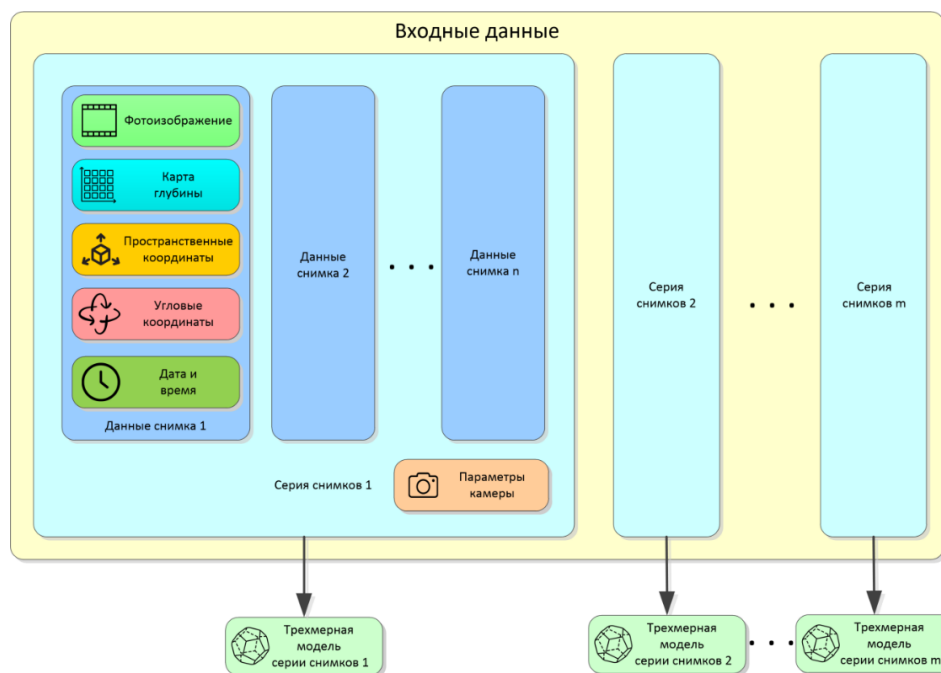


Рис. 2. Структурная схема входных данных базы данных

Введем для отдельного i -го снимка j -й серии снимков обозначение F_i , при этом здесь и в дальнейшем под «снимком» будем подразумевать вектор данных, относящихся к отдельному снимку (фотоизображение, карта глубины, координаты и углы вращения, дата и время). Несколько снимков, полученных одной камерой за один проход, составляют серию снимков:

$$C_j = \bigcup_{i=1}^n F_i,$$

где C_j — j -я серия снимков, n — количество снимков в j -й серии снимков. При этом выполняется условие:

$$C_j \supseteq F_i.$$

означающее, что каждый i -й снимок принадлежит соответствующей j -й серии снимков. В базе данных хранится совокупность серий снимков C :

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\},$$

где m — количество серий снимков, хранящихся в базе данных.

Для каждой j -й серии снимков в результате процесса трехмерной реконструкции создается соответствующая трехмерная модель V_j :

$$V_j = T(C_i, K_j),$$

где T – оператор трехмерной реконструкции, K_j – вектор параметров камеры, необходимых для трехмерной реконструкции (фокусное расстояние, координаты главной точки, разрешение, параметры дисторсии [3]), с помощью которой была получена j -я серия снимков.

Выходными данными базы данных являются трехмерные модели ограниченных пространств. Рассмотрим трехмерные модели ограниченных пространств на примере рисунков 4, 5, на которых изображены трехмерные модели подземных горных выработок. На рис. 4 трехмерная модель фрагментирована на отдельные участки, выделенные разным цветом.

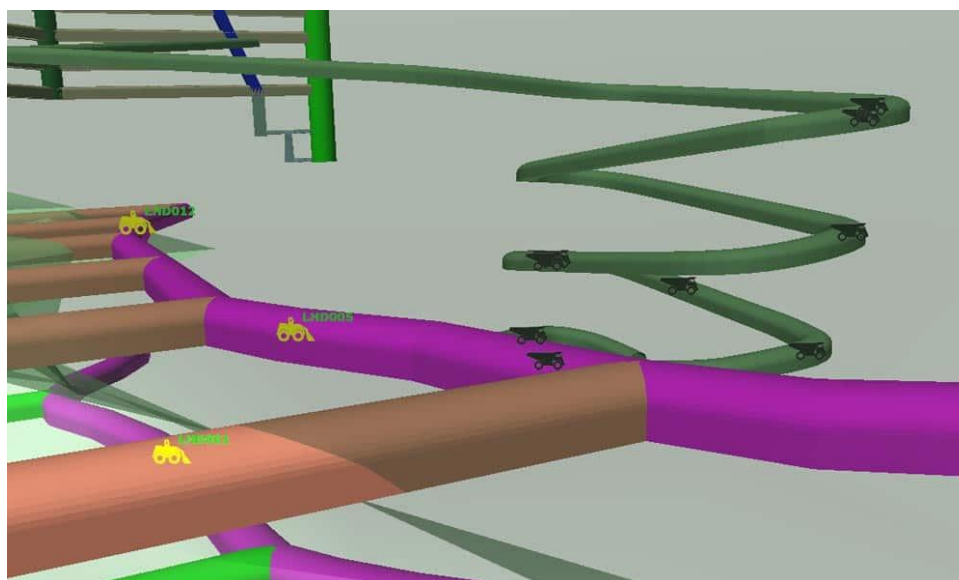


Рис. 4. Трехмерная модель ограниченного пространства (вид снаружи) [4]

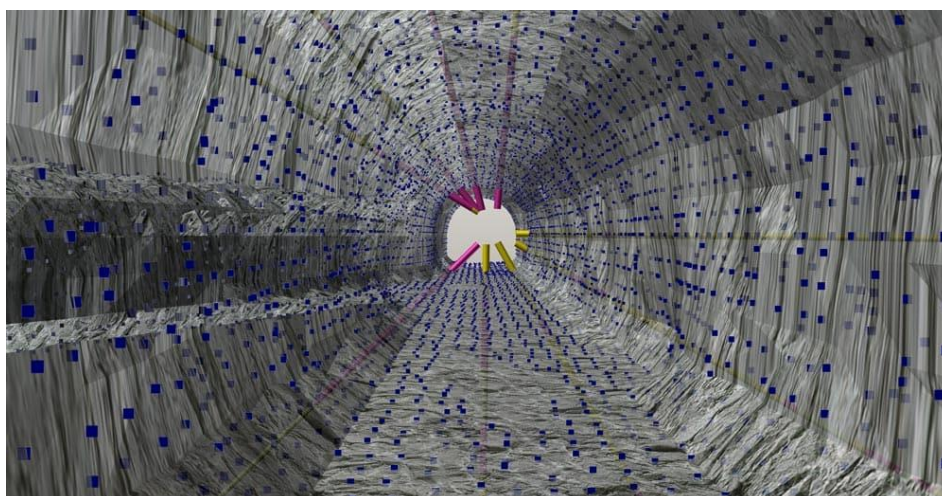


Рис. 5. Трехмерная модель ограниченного пространства (вид изнутри) [5]

Как видно из рисунка 5, трехмерная модель ограниченного пространства представляет собой плоскостную модель внутренней поверхности ограниченного пространства.

Для использования в базе данных необходима декомпозиция ограниченного пространства на отдельные пространственные объекты, так как хранение единой модели в исходной высокой детализации требует больших вычислительных мощностей для хранения и обработки.

Декомпозиция ограниченного пространства на отдельные пространственные объекты позволяет реализовать следующие возможности:

1. Распределённое хранение данных. Возможность использования распределённых хранилищ данных для размещения различных групп пространственных объектов.

2. Структурирование данных. Организация структуры хранения данных позволит выполнять независимую обработку отдельных объектов.

3. Многоуровневая детализация. Возможность представления каждого уровня в различном разрешении для оптимального отображения пространственных данных.

4. Мониторинг динамики. Отслеживание изменений отдельных пространственных объектов во времени.

5. Реализация цифрового двойника. Присвоение каждому пространственному объекту динамически изменяющихся статусов и состояний для создания цифрового двойника.

Применим трехуровневую декомпозицию ограниченного пространства. Так как база данных может применяться для разных сфер применения, введем универсальные названия для объектов каждого уровня декомпозиции. Под элементом подразумевается базовая единица, не подлежащая дальнейшему разбиению в рамках данной структуры. Под подсистемой подразумевается совокупность взаимосвязанных элементов, в свою очередь, являющаяся частью системы. Под системой подразумевается совокупность элементов и подсистем, взаимодействующая с внешней средой как единый объект [6]. Таким образом, используем следующие названия типов объектов: «пространственная система» для уровня декомпозиции 1, «пространственная подсистема» для уровня декомпозиции 2 и «пространственный элемент» для уровня декомпозиции 3. В таблице 1 приведена структура декомпозиции ограниченного пространства и примеры пространственных объектов каждого уровня для разных сфер применения.

Таблица 1. Структура пространственных объектов на основе декомпозиции ограниченного пространства

Уровень декомпозиции	Тип пространственного объекта	Примеры пространственных объектов ограниченных пространств в зависимости от сферы применения		
		Социальная сфера	Горная промышленность	Производство
Уровень 1 (верхний)	Пространственная система	Здание	Система горных выработок шахты	Завод
Уровень 2	Пространственная подсистема	Этаж	Горизонт	Цех
Уровень 3 (нижний)	Пространственный элемент	Помещение	Горная выработка	Производственный участок

Трехмерные модели, полученные на основе серии снимков, могут включать несколько пространственных элементов, поэтому их следует сегментировать на отдельные пространственные элементы (см. рис. 3).

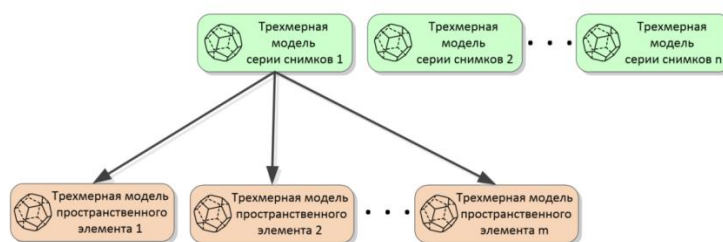


Рис. 3. Сегментирование трехмерных моделей серий снимков на трехмерные модели пространственных элементов

Полученные в результате сегментирования пространственные элементы не должны пересекаться между собой:

$$\begin{cases} \{E_i\}_{i=1}^m = S(V_j) \\ E_i \cap E_j = 0, \forall_{i,j} \in \{1, 2, \dots, m\}, i \neq j \end{cases}$$

где E_i – трехмерная модель i -го пространственного элемента ограниченного пространства, S – оператор сегментации, m – количество пространственных элементов, которые можно сегментировать из трехмерной модели серии снимков, i, j – номера двух произвольных пространственных элементов.

При этом условием для возможности сегментирования отдельного пространственного элемента является полное покрытие внутренней поверхности его ограниченного пространства серией снимков:

$$\begin{cases} D = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^{unique}}{A_{total}} \\ D \approx 1 \end{cases}$$

где A_i^{unique} – уникальная площадь поверхности ограниченного пространства, которую охватывает i -й снимок (без учета площади ограниченного пространства, которая охвачена предыдущими снимками), n – количество снимков, A_{total} – полная площадь внутренней поверхности ограниченного пространства. Коэффициент D приблизительно равен единице, так как существует погрешность измерения.

Пространственные элементы E_i объединяются в пространственную подсистему B_j :

$$B_j = \bigcup_{i=1}^n E_i,$$

где n – количество пространственных элементов в подсистеме B_j , а m пространственных подсистем объединяются в пространственную систему S_x :

$$S_x = \bigcup_{j=1}^m B_j.$$

В базе данных хранится совокупность пространственных систем S :

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\},$$

где k – количество пространственных систем.

При этом выполняется условие вложенности сущностей:

$$S_x \supseteq B_j \supseteq E_i,$$

которое означает, что каждый пространственный элемент E_i принадлежит одной из пространственных подсистем B_j , а каждая пространственная подсистема B_j принадлежит одной из пространственной систем S_x .

Полученные трехмерные модели пространственных объектов будут иметь локальную систему координат, так как координаты точек трехмерных моделей будут пересчитаны из координат пространственного положения снимков в процессе трехмерной реконструкции. Поэтому требуется выполнить пространственную привязку, означающую определение позиции пространственных объектов в реальном мире [7]. Для этого в базе данных к пространственным объектам верхнего уровня применяется способ пространственной привязки с использованием координат. При этом способе устанавливают соответствие определенных точек пространственного объекта (в локальной системе координат) к координатам точек в реальном мире (в глобальной системе координат).

На рис. 6 представлена структурная схема выходных данных базы данных.

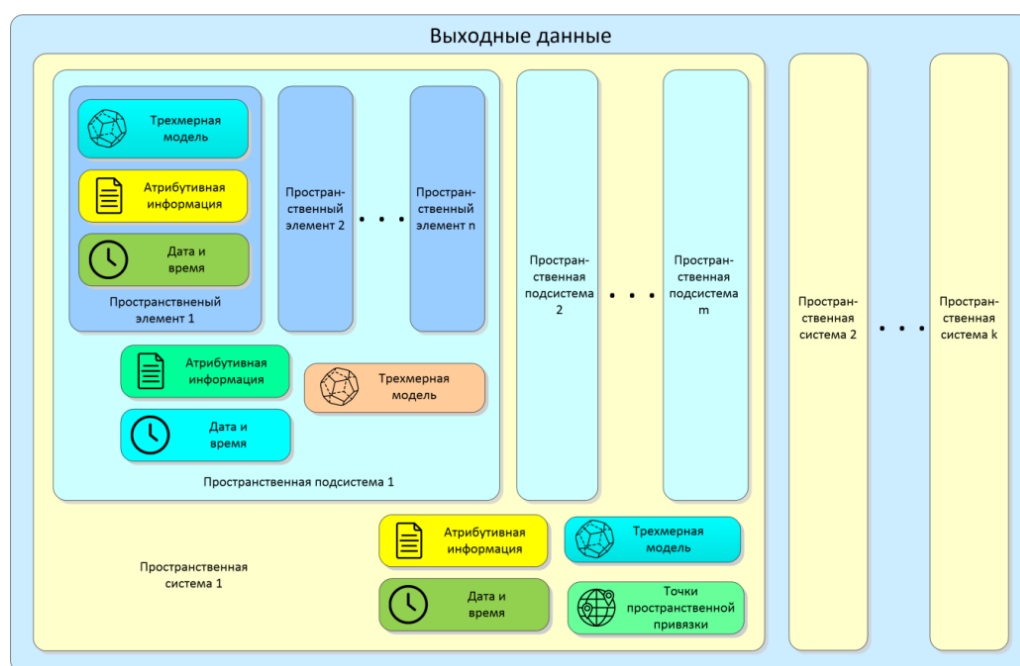


Рис. 6. Структурная схема выходных данных базы данных

Трехмерные модели объектов для разных уровней декомпозиции необходимо создавать с различной степенью детализации, поскольку это позволяет оптимизировать использование вычислительных ресурсов. На верхних уровнях достаточно обобщенных представлений пространственных объектов, тогда как на нижнем уровне требуется высокая степень детализации для точного описания всех деталей объекта [8, 9].

Объекты с разной степенью детализации получают путем упрощения исходной трехмерной модели с высоким уровнем детализации O :

$$O_i = R(O, L_i),$$

где R – оператор упрощения модели, L_i – i -й уровень детализации, O_i – трехмерная модель с i -м уровнем детализации.

На рис. 7 представлена разработанная структурная схема базы пространственных данных ограниченного пространства в виде ER-диаграммы (модели «сущность-связь»). Структурная схема базы данных объединяет структуры входных и выходных данных и приведена к нормальной форме.

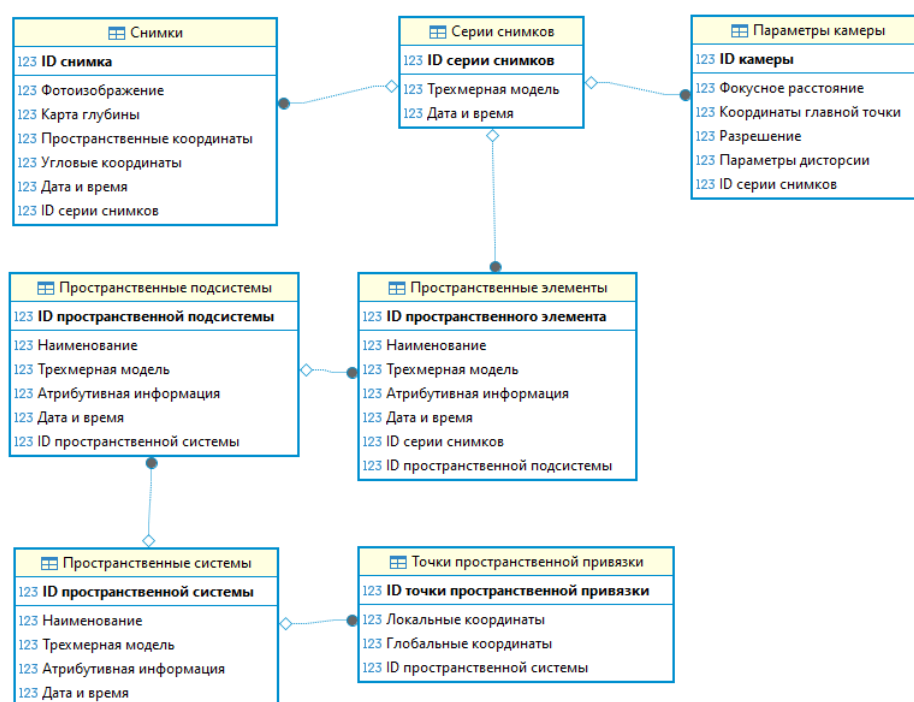


Рис. 7. Структурная схема базы пространственных данных ограниченного пространства

Примечания к структурной схеме базы данных на рис. 7:

1. Структурная схема описывает логическую модель базы данных, представленную в виде модели «сущность-связь», а не фактическую реализацию на программно-аппаратном уровне. Например, при фактической реализации базы данных, поле «Атрибутивная информация» может быть заменено на несколько полей атрибутов, а поля «Трехмерная модель», «Фотоизображение», «Карта глубины» могут содержать ссылки на соответствующие объекты, которые хранятся отдельно.

2. Для пространственных объектов помимо ключевого поля с надписью «ID...» имеется поле «Наименование», так как в базе данных могут храниться несколько экземпляров одного и того же пространственного объекта, созданные в разное время.

Выводы. Разработанная структурная схема базы данных позволяет создать реляционную модель ограниченного пространства, полученную в ходе пространственного сканирования ограниченного пространства разными камерами глубины в разные промежутки времени. База данных может применяться для мониторинга изменений в ограниченных пространствах, создания цифровых двойников промышленных предприятий и систем информационного моделирования зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2005-12-28. – М. Стандартинформ, 2005. – 15 с.
2. Об утверждении Правил по охране труда при работе в ограниченных и замкнутых пространствах: Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 902н.
3. Чибунчев, А. Г. Фотограмметрия: учебник для вузов / А. Г. Чибунчев. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. – 328 с.
4. Efficient mining: Micromine's intelligent software solution [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.micromine.kz/efficient-mining> (дата обращения: 01.09.2025).
5. Mining software visualising techniques [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.micromine.kz/mining-software-visualising-techniques> (дата обращения: 01.09.2025).
6. Волкова, В. Н. Теория систем и системный анализ: учебник для вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 3-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 562 с.
7. ГОСТ Р 70316-2022. Пространственные данные. Пространственная привязка по географическим идентификаторам: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2022-09-02. – М.: Стандартинформ, 2022. – 19 с.
8. Level of Development (LOD) Specification [Электронный ресурс]. – URL: <https://bimforum.org/lof/> (дата обращения: 04.09.2025).
9. СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла: свод правил / Минстрой России. – М., 2020. – 177 с.

Поступила в редакцию 09.09.2025 г., рекомендована к печати 02.10.2025 г.

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL SCHEME FOR A SPATIAL DATABASE OF LIMITED SPACE

Sorokin A.I., Kurnosov V.G.

This paper presents the development of a structural diagram of a spatial database of a limited space based on spatial scanning data obtained using a depth camera. A conceptual model of a spatial database for information modeling of limited spaces of underground mine workings, industrial enterprises, buildings and structures is considered. The structure of input and output data is considered. The main entities are identified and the relationships between them are described in the form of an ER diagram.

Keywords: structural diagram, spatial database, limited space, photographic image, 3D model, depth camera, ER diagram.

Сорокин Александр Игоревич

младший научный сотрудник отдела автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: alexandrsorokin96@mail.ru

Sorokin Aleksandr Igorevich

Junior Researcher at Department of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Курнос Вьячеслав Григорьевич

доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора по научной работе ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: avtomatgormash@mail.ru

Kurnosov Viacheslav Grigorevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, First Deputy Director for Scientific Work of State Institution of Automatgormash named after V.A. Antipov,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ ПОСТБИНАРНОГО КОДИРОВАНИЯ

© 2025 Койбаш А.А., Завадская Т.В., Койбаш А.В.

Представлена программно-аппаратная реализация инфраструктуры сбора сенсорных данных с использованием принципов постбинарного кодирования. Разработан прототип системы, включающий сенсорный узел на базе микроконтроллера STM32 с библиотекой тетралогических форматов и серверную часть на основе веб-сервиса и нереляционной базы данных. Реализован полный цикл измерения, интервальной обработки, беспроводной передачи и визуализации данных в режиме реального времени. Экспериментально подтверждена эффективность подхода для сохранения информации о неопределенности измерений и стабильность работы комплекса в динамических режимах.

Ключевые слова: сенсорные системы, Интернет вещей, STM32, постбинарный компьютеринг, тетралогика, интервальные данные, программно-аппаратный комплекс.

Введение. Стремительное развитие концепций Интернета вещей [1] и киберфизических систем создаёт необходимость в большом количестве датчиков, интегрированных в глобальную информационно-компьютерную инфраструктуру. В связи с этим на протяжении последних десятилетий идёт тенденция к проектированию компактных сенсорных систем [2], имеющих собственный вычислительный блок и обладающих возможностью одновременного измерения нескольких характеристик окружающей среды благодаря датчикам разного типа. Такие устройства передают другим участникам сети необходимую информацию для автоматизированного принятия решений, что делает многие процессы, связанные с компьютерными технологиями, зависимыми от качества предоставляемых данных.

Эти концепции уже сегодня находят своё применение в различных областях человеческой деятельности. Сенсорные системы передают данные о влиянии характеристик окружающей среды на здоровье человека [3], могут предоставлять информацию о многих муниципальных аспектах как умных городов [4], так и следующей ступени их эволюции – супергородов [5]. В связи с этим очевидным является тот факт, что степень интеграции систем на основе датчиков в общую информационно-компьютерную инфраструктуру будет только возрастать по мере увеличения потребности в автоматизации и необходимости сбора большого количества данных для анализа.

Несмотря на то, что современные тенденции в сфере разработки микроэлектронных датчиков демонстрируют устойчивое снижение их габаритов и энергопотребления [6], актуальными остаются вопросы точности измерений и обработки стохастических шумов (погрешностей). В этом направлении и по сей день проводятся множество исследований, среди которых можно найти и высокоточные многофункциональные модули, призванные улучшить точность с производительностью сенсорных систем [7], и АЦП для устройств со встроенной коррекцией ошибок на основе случайного леса [8]. Однако сам подход с преобразованием результатов в точечные значения (форматы с плавающей точкой IEEE 754) часто приводит к потере информации о реальной достоверности измерений.

Решить эту проблему можно путём перехода к интервальному представлению данных с использованием постбинарного кодирования информации. Теоретические основы данного подхода описаны авторами в монографии [9] и расширяют традиционный двоичный кодо-логический базис двумя дополнительными состояниями: М (множественность) и А (неопределённость). Такая логика четырёх состояний названа тетралогикой. Использование постбинарного компьютинга позволит расширить возможности сенсорных систем путём их встраивания в вычислительную архитектуру следующего поколения. Также это даёт возможность хранить физическую величину не просто в виде одного числа, а в виде закодированного в тетралогическом формате интервала. Данный способ позволяет инкапсулировать информацию о погрешности и динамике сигнала непосредственно в машинное слово, что было предложено в работе [10] и детально проанализировано в различных гипотетических ситуациях в статье [11].

Несмотря на наличие теоретического обоснования и алгоритмической базы, актуальной задачей остаётся апробация данного подхода на реальном оборудовании. Необходимо подтвердить практическую возможность выполнения операций постбинарного кодирования во встраиваемых системах в режиме реального времени, а также обеспечить передачу и хранение такого вида информации в стандартной сетевой инфраструктуре.

Целью данной работы является проектирование и физическая реализация прототипа суперсенсорной системы, а также симуляции работы постбинарной инфраструктуры с обеспечением полного цикла обработки данных: от измерения физической величины и первичной постбинарной обработки на микроконтроллере до передачи тетракода на сервер, хранения в базе данных и визуализации через веб-интерфейс.

Архитектура программно-аппаратного комплекса. Для реализации поставленной задачи разработана многоуровневая архитектура, которая сочетает низкоуровневые аппаратные решения с высокоуровневыми веб-технологиями. Схема взаимодействия компонентов представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Архитектура прототипа экспериментальной постбинарной инфраструктуры

Данная схема позволяет реализовать в полной мере классическую пятиуровневую архитектуру Интернета вещей:

1. Уровень устройства: экспериментальная сенсорная система, осуществляющая сбор сырых данных, их фильтрацию, обработку согласно алгоритму работы [10] и отправку информации в постбинарном формате;

2. Уровень шлюза: Wi-Fi-маршрутизатор, позволяющий передать интервал в тетракоде с сенсорной системы на сервер;

3. Уровень сети: основан на базе протоколов TCP/IP, обеспечивающих взаимодействие сенсорной системы с сервером через сокет (программный интерфейс), а также веб-интерфейса пользователя с сервером посредством REST API.

4. Уровень платформы: представлен сервером (backend), принимающим данные с сенсорной системы и обладающим необходимым инструментарием для кодирования/декодирования данных между двоичными и тетралогическими форматами, а также нереляционной базой данных, оптимизированной для хранения документов с произвольной структурой полей;

5. Уровень приложений: веб-интерфейс (frontend) для визуализации декодированных интервалов в режиме реального времени.

Такой подход обеспечивает модульность, масштабируемость и возможность независимой модернизации каждого элемента системы.

Проектирование и реализация экспериментальной сенсорной системы.

Аппаратная часть реализована на базе отладочной платы STM32F407G-Discovery. Принципиальная электрическая схема приведена на рисунке 2.

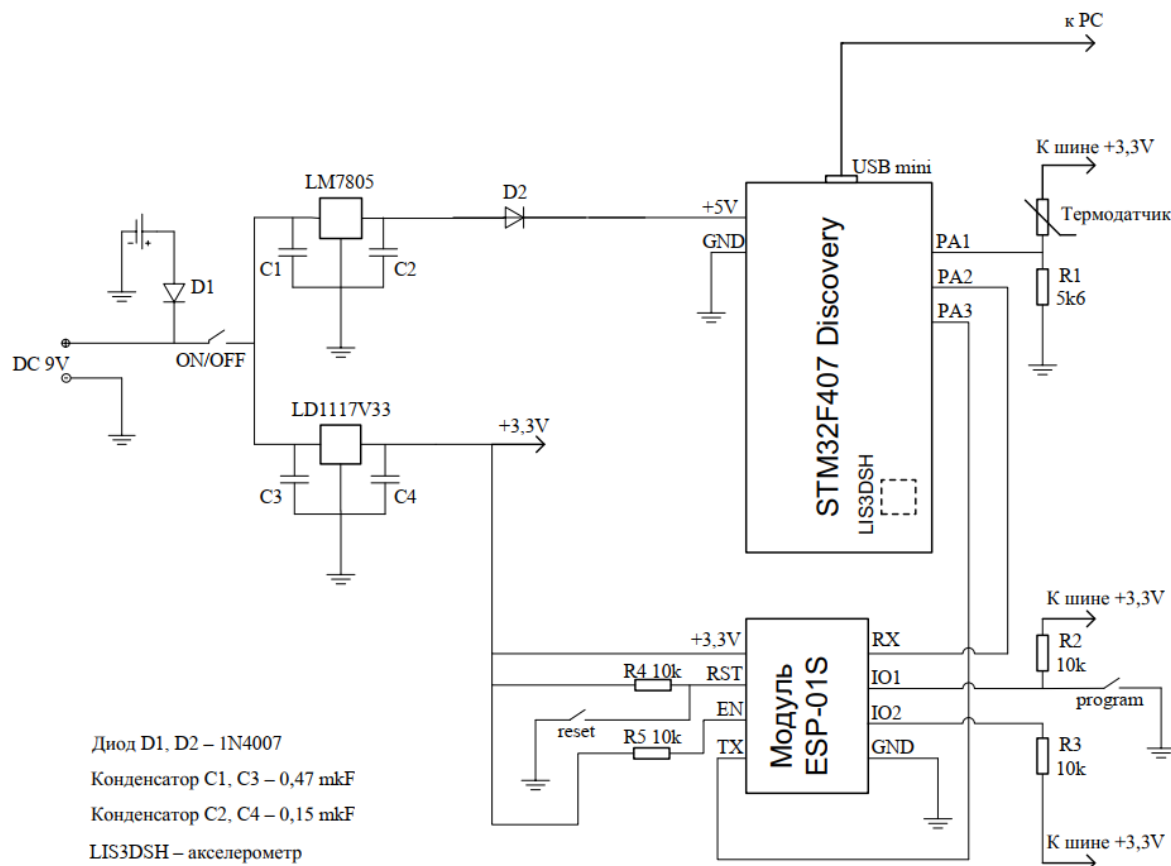


Рис. 2. Экспериментальная сенсорная система. Схема электрическая принципиальная

Выбор данного устройства обусловлен наличием важных для эксперимента компонентов:

- 32-битного микропроцессор Arm Cortex с 1 Мб флеш-памяти, 192 кб ОЗУ и модулем операций с плавающей точкой, что важно для быстрых вычислений границ интервалов перед постбинарным кодированием;
- 3-осный микроэлектромеханический акселерометр;
- 4 светодиода разных цветов для индикации различных режимов работы;
- как цифровых, так и аналоговых входов/выходов;
- питание с напряжением 3В или 5В.

Для создания прототипа сенсорной системы с несколькими датчиками к устройству дополнительно подсоединён внешний терморезистор, преобразующий значение температуры к определённому уровню напряжения. Квантование сигнала происходит посредством встроенного 12-битного аналогово-цифрового преобразователя.

Передача данных организована с использованием Wi-Fi-модуля ESP-01S (на базе чипа ESP8266), подключенного к интерфейсу UART микроконтроллера. Программное управление осуществляется путём использования AT-команд.

Для стабилизации питания разработан блок, формирующий из входного напряжения линии +5 В для самой платы STM32 и +3,3 В для модуля ESP-01S.

Внешний вид собранного прототипа отображен на рисунке 3.



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной сенсорной системы

Программная часть представлена комплексом подпрограмм различного назначения (измерение, обработка и передача данных), написанных на языке программирования C++ и интегрированных в аппаратную часть виде прошивки контроллера – набора машинных инструкций, собранного для архитектуры ARM с использованием среды разработки Keil uVision.

Реализация самого алгоритма измерений полностью соответствует теоретическому описанию из статьи [10]: в режиме реального времени проводится сбор 16 показаний датчиков для обеспечения статистически значимой выборки, после чего проводится симметризация интервала и преобразование полученного интервала в тетракод. Для самой процедуры постбинарного кодирования создана отдельная библиотека на языке программирования C++, в которой реализован описываемый авторами монографии [9] тип данных Postbinary 64/32p.

Использование объектно-ориентированной парадигмы предоставляет инструменты для инкапсуляции битовых операций, что позволяет напрямую работать с постбинарными типами данных, эмулируя работу тетралогического устройства на базе обычной двоичной логики. Кроме того, специфика языка обеспечивает кроссплатформенность библиотеки, давая возможность использовать постбинарные типы данных не только в ARM, но и на других архитектурах и платформах.

Организация шлюза и способа передачи данных. Классические сетевые каналы обладают достаточным функционалом для отправки постбинарной информации, поскольку закодированные тетракодом интервалы реализованы на базе стандартной двоичной логики. Поэтому для отправки данных на сервер используется Wi-Fi-сеть, в которой маршрутизатором является мобильный телефон, подключенный к сети мобильной связи по технологии 4G. Передача данных происходит посредством Wi-Fi-модуля, подключенному к мобильному телефону и управляемого с использованием специализированной библиотеки на основе AT-команд.

Отправляемая информация преобразована в формат JSON, при этом постбинарные числа передаются в виде байтового массива. Чтобы избежать коллизии с управляющими символами при преобразовании в строковое представление, использовано кодирование по стандарту base64. Пример пакета данных представлен на рисунке 4.

```
{
  "IMEI": "739573019348737",
  "temperature": "ZVambwAAAA0=",
  "accelerometer": {
    "x": "WqmvAAAAAA0=",
    "y": "mq8AAAAAA0=",
    "z": "ZVZWrwAAAA0="
  }
}
```

Рис. 4. Пакет данных в формате JSON

Разработка серверной инфраструктуры центра обработки данных. Серверная часть комплекса реализована на языке программирования Python и реализована на базе платформы Linux (Ubuntu 24.04 LTS). Она выполняет роль связующего звена между аппаратной частью и пользователем.

Для интеграции библиотеки на C++ с серверным программным обеспечением использовался инструмент SWIG, позволяющий скомпилировать код в виде динамической библиотеки и использовать написанные на C++ низкоуровневые высокопроизводительные алгоритмы внутри интерпретируемой среды Python без значительной потери в скорости выполнения.

Приём данных с сенсорных систем осуществляется посредством использования программного интерфейса «сокет», открывающего TCP/IP-соединение на порту под номером 3000. Сервер способен поддерживать более 10 000 таких соединений одновременно. Получив пакет данных в формате JSON, сервер декодирует поля из base64 в байт-массив, представляющий постбинарный интервал.

Эта информация записывается на хранение в нереляционную (NoSQL) СУБД MongoDB. В контексте постбинарной инфраструктуры она обладает следующими преимуществами: гибкостью модели данных, горизонтальной масштабируемостью, высокой доступностью и отказоустойчивостью. Таким образом, данное решение даёт возможность хранить различные постбинарные форматы напрямую в виде байт-массивов и удобно оперировать этими данными для дальнейшего анализа.

Структура документа в коллекции базы данных включает метаданные устройства (идентификатор, временная метка) и полезные данные – интервал измерений в «сыром» виде. Декодирование производится по требованию: при запросе пользователем данных (просмотр графика) сервер извлекает байт-массив из базы данных, передаёт их в подключенную библиотеку, получает декодированный интервал в виде двух чисел [min, max] и отправляет их на веб-интерфейс.

Реализация веб-интерфейса для визуализации данных. На рисунке 5 отображен график температуры, а на рисунке – 6 график измерений акселерометра.

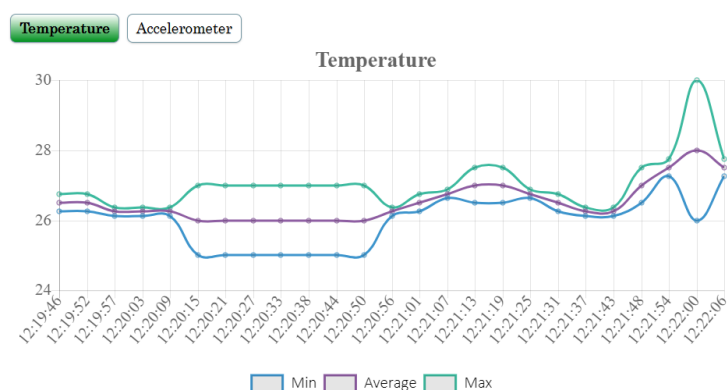


Рис. 5. Скриншот веб-страницы с графиком значений температуры (после декодирования)

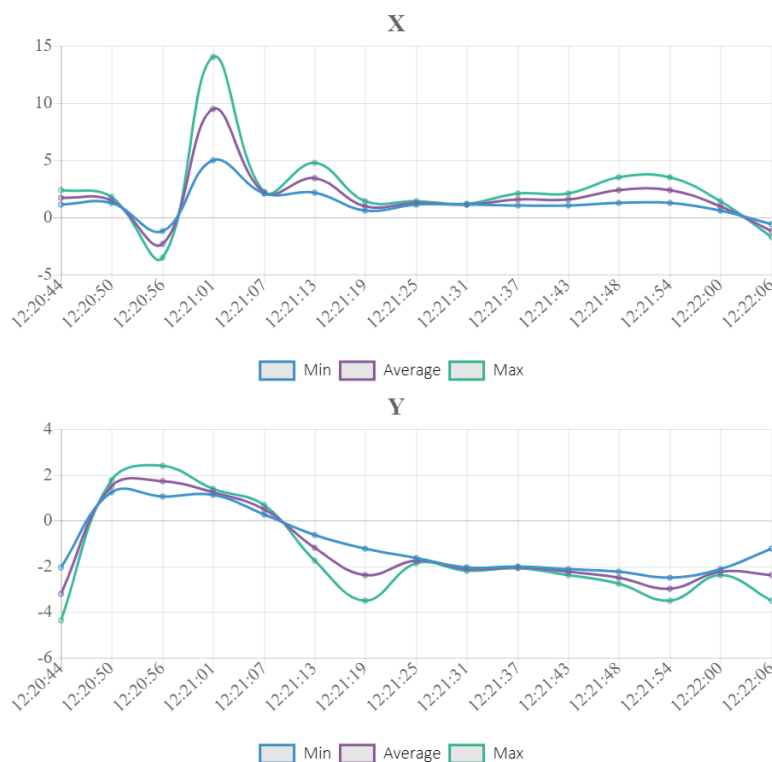


Рис. 6. Скриншот веб-страницы с графиком значений акселерометра (после декодирования)

Данные отображаются посредством пользовательского веб-интерфейса с использованием HTML5, CSS3 и библиотеки построения графиков Chart.js. Клиентская часть производит циклический опрос сервера по HTTP API, получая набор актуальных декодированных значений.

Визуализация интервальных данных имеет свои особенности. В отличие от традиционных графиков, постбинарный график представляет собой интервалы значений: нижняя линия соответствует левой границе декодированного интервала, верхняя линия – правой границе, а полезный сигнал находится внутри такого «коридора».

В ходе экспериментальной проверки сенсорной системы исследовалось поведение алгоритма как в статических измерениях, так и при динамическом изменении измеряемой физической величины (резкий нагрев, тряска). Подтверждено, что программно-аппаратный комплекс стабильно функционирует в режиме реального времени. Задержки, вносимые процедурами постбинарного кодирования/декодирования, пренебрежимо малы по сравнению с самими сетевыми задержками. Также в моменты высокой динамики сигнала зафиксировано расширение интервала. Такой феномен расширения неопределённости связан с ростом неопределённости самих входных и визуально отображается в виде «пузырей», что подтверждает теоретические положения тетралогии и сигнализирует пользователю о снижении достоверности измерений в данном моменте.

Выводы. В результате работы спроектирована и реализована полнофункциональная инфраструктура для сбора и обработки данных в постбинарных форматах. Созданная кроссплатформенная библиотека постбинарных форматов доказала свою работоспособность на архитектурах ARM (микроконтроллеры) и x86/64 (сервер). Разработанный аппаратный модуль на базе отладочной платы STM32F407-Discovery обеспечивает сбор данных, симметризацию и постбинарное кодирование интервала, а также передачу информации посредством Wi-Fi, что подтверждает применимость этих алгоритмов в устройствах Интернета вещей с ограниченными ресурсами. Серверная часть, в состав которой входит backend-приложение на python и нереляционная база данных MongoDB, обеспечивает гибкое хранение и обработку постбинарной информации с сенсорных систем.

Полученный прототип может служить экспериментальной платформой для дальнейших исследований в области сенсорных систем нового поколения. Дальнейшие направления работы включают внедрение адаптивных алгоритмов выбора формата кодирования в зависимости от динамики сигнала, а также применение методов машинного обучения к интервальным данным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Койбаш, А. А. Закономерности развития сенсорной составляющей мобильных компьютерных систем / А. А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 3–5 декабря 2020 г.): в 3 т. / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. – Т. 1. – 284 с.
2. Койбаш, А. А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры / А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 2(16). – С. 51-57.
3. Wu, F. WE-Safe: A Self-Powered Wearable IoT Sensor Network for Safety Applications Based on LoRa / F. Wu, J. Redouté, M. R. Yuce // IEEEAccess, 2018, Vol. 6, pp. 40847-40853, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8419707> (accessed 15 October 2025).
4. Аноприенко, А. Я. Анализ эффективности устройств сенсорной составляющей образовательной системы умного города / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Е. И. Приходченко // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2020. – № 1(19). – С. 5-11.
5. Rathore, M. M. IoT-Based Big Data: From Smart City towards Next Generation Super City Planning / M. M. Rathore, P. Anand, A. Awais, J. Gwanggil // International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS), 13(1), 2017, pp. 28-47.

6. Аноприенко, А. Я. Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2021. – № 1–2 (23–24). – С. 14–21.
7. Design of Lightweight, High Precision, Multi Scene Module Based on Narrowband Internet of Things / F. Sun, X. Liu, L. Shangguan, J. Ren [et al.] // Journal of Advances in Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 2, no. 2. – P. 1–7. – DOI 10.62177/jaet.v2i2.224
8. High Precision 16-bit SAR ADC with Random Forest-based Error Correction for IoT Devices / V. Gowrishankar, M. Parimala Devi, M. Bharanipriya [et al.] // 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM). – Kanyakumari, India, 2025. – P. 753–758. – DOI 10.1109/ICTMIM65579.2025.10988272.
9. Аноприенко, А. Я. Введение в постбинарный компьютинг. Арифметико-логические основы и программно-аппаратная реализация / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница. — Донецк: ДонНТУ-УНИТЕХ, 2017. — 308 с.
10. Койбаш, А. А. Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем / А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – № 4(26). – С. 63–69.
11. Койбаш, А. А. Анализ эффективности модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем / А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – № 1(31). – С. 50–58.

Поступила в редакцию 19.09.2025 г., рекомендована к печати 06.10.2025 г.

SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF INFRASTRUCTURE FOR COLLECTION AND PROCESSING OF INTERVAL DATA USING POST-BINARY CODING PRINCIPLES

Koibash A.A., Zavadskaja T.V., Koibash A.V.

The paper presents a software and hardware implementation of sensor data collection infrastructure using post-binary coding principles. A system prototype has been developed, including an STM32-based sensor node with a tetralogical format library and a server part based on a web service and a non-relational database. A full cycle of measurement, interval processing, wireless transmission, and real-time data visualization has been implemented. The effectiveness of the approach for preserving measurement uncertainty information and the stability of the complex in dynamic modes have been experimentally confirmed.

Keywords: sensor systems, Internet of Things, STM32, post-binary computing, tetralogic, interval data, hardware-software complex.

Койбаш Александр Андреевич

старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: mr.koibash@gmail.com

Koibash Aleksandr Andreevich

Senior Lecturer of the Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Завадская Татьяна Владимировна

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой компьютерной инженерии ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: tatyana.zavadskaja@gmail.com

Zavadskaja Tatiana Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Койбаш Андрей Владимирович

технический директор ООО «ТРК «ГЛОБУС»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: akoybash001@rambler.ru

Koibash Andrei Vladimirovich

Technical Director of GLOBUS TV and Radio Company LLC,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗАЦИИ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ БИБЛИОТЕКИ STREAMLIT

© 2025 Пономарёв Д.С.

Streamlit является сравнительно новой, быстроразвивающейся библиотекой, которая ориентирована на разработку и развертывание веб-приложений для научных исследований, машинного обучения и статистического анализа данных. Однако, на сегодняшний день для данной библиотеки отсутствуют готовые решения по аутентификации пользователей, что может явиться серьезным вопросом при разработке программных продуктов, поддерживающих приватность пользователей или ограниченность доступа пользователей. Поэтому, поставленной целью исследования явилась разработка алгоритмов и подходов для создания системы аутентификации пользователей с возможностью администрирования (с учетом возможностей интеграции в веб-приложения созданных на основе Streamlit). Основное внимание в работе было уделено обеспечению безопасности через хеширование паролей с использованием библиотеки `Wcrypt` и управлению пользовательскими данными через файловое хранилище в формате JSON. Рассмотрены варианты администрирования разработанной системы с возможностью обеспечения ограничений доступа для определенных пользователей. Представлены ключевые аспекты архитектуры системы, включая регистрацию пользователей, аутентификацию, управление данными, а также запись в файл JSON. В представленных примерах был использован функциональный подход: рассмотрена разработка как функций, так и отдельных составляющих разрабатываемой системы, их взаимодействие между собой, а также их алгоритмическая реализация. Рассмотрено применение общеизвестных паттернов проектирования и системного дизайна, обработка ошибок. Приведены примеры записи зашифрованных паролей в хранилище. Результаты представленной работы включают разработку архитектуры системы аутентификации, алгоритмов шифрования паролей, методов управления учетными записями и их интеграцию в веб-приложения. Практическая полезность представленной разработки заключается в возможности интеграции (без каких-либо значимых изменений в исходном коде) системы аутентификации пользователей в приложение или информационную систему, которые основаны на библиотеке Streamlit (в частности, это могут быть системы для проведения научных исследований, для работы с статистическими данными или создания и использования моделей машинного обучения).

Ключевые слова: системы контроля управления доступом, паттерны проектирования, алгоритмы шифрования, Python, `Wcrypt`, Streamlit.

Введение. На сегодняшний день использование в научных исследованиях таких библиотек Python как NumPy, Pandas, SciKit-Learn, SciPy, TensorFlow, Keras, PyTorch и др. становится все более и более популярным решением [1]. Одной из проблем в их применении является дальнейшее представление научных результатов для ученых-коллег и общественности, которые не знакомы с языками программирования (здесь стоит отметить, что практика развертывания научных проектов при помощи контейнеров Docker частично может решить данную проблему, однако не закрывает данный вопрос полностью [2]). Поэтому, в сфере разработки программного обеспечения в последние годы стали появляться библиотеки Python, которые позволяют создавать веб-приложения с ориентиром на интеграцию с научными исследованиями и библиотеками для статистической обработки данных и машинного обучения. Среди таких библиотек можно выделить Streamlit, Solara, Gradio. Актуальность применения Streamlit в научных исследованиях были рассмотрены в опубликованных ранее работах [3, 4]. Так как данная библиотека является сравнительно новой, то по многим вопросам ее применения отсутствуют готовые общепринятые шаблонные решения.

В частности, на сегодняшний день отсутствуют готовые решения по аутентификации пользователей. Поэтому, в данной работе представлено возможное решение по программной реализации системы аутентификации пользователей для веб-приложений на основе библиотеки Streamlit с использованием методов шифрования паролей.

Предложенная система включает такие функциональные элементы как загрузку данных пользователей, аутентификацию, регистрацию. Хранение паролей было реализовано при помощи безопасного хранения информации в формате JSON. (использование данного формата в подобных задачах является уже хорошо зарекомендовавшей себя практикой [5]). Шифрование (хеширование) паролей было рассмотрено на примере bcrypt, актуальность использования данной библиотеки было обосновано в ранее опубликованной работе [6].

В качестве примеров реализации в коде был использован Python. Рассмотрена реализация систем аутентификации для веб-приложений, которые разработаны на основе библиотеки Streamlit. Представленные методы, алгоритмы и подходы прежде всего ориентированы на веб-приложения и информационные системы (далее – ИС), для которых рассматривается доступ ограниченного количества пользователей (который в свою очередь согласован с руководством научного подразделения, предприятия, организации или компании, для которых они разработаны).

Разработка подходов для реализации. Система аутентификации должна быть загружена для пользователя в первую очередь перед непосредственно запуском сервисов ИС. Рассмотрим разработку на примере систем аутентификации «Логин-Пароль». Для начала представим простой пример, который, однако, не следует применять на практике:

```
def authenticate(username, password):
    users = {
        "user_1": "password_1",
        "user_1": "password_1",
        "admin": "password_3"
    }
    if username in users and users[username] == password:
        return True
    return False
```

– в данном примере логины и пароли хранятся непосредственно в самом коде ИС и на сегодняшний день это является плохим решением с позиций информационной безопасности. Для безопасной аутентификации логины и пароли не должны храниться в коде приложения. Вместо этого они могут быть сохранены во внешней базе данных или файле с применением хеширования паролей [7].

Рассмотрим, как можно реализовать аутентификацию с использованием файлового хранилища для логинов и паролей, где пароли будут храниться в зашифрованном виде.

Для поставленной задачи следует определить следующие шаги:

- организация хранения хешированных паролей в отдельном файле (например, JSON, также может быть использована и база данных (далее – БД));
- создание аутентификации через сравнение введенного пароля с хешем пароля;
- следует также принять во внимание возможность расширения созданного хранилища паролей.

Ментальная карта (Mind Map) разработки СКУД представлена на рисунке 1 далее.

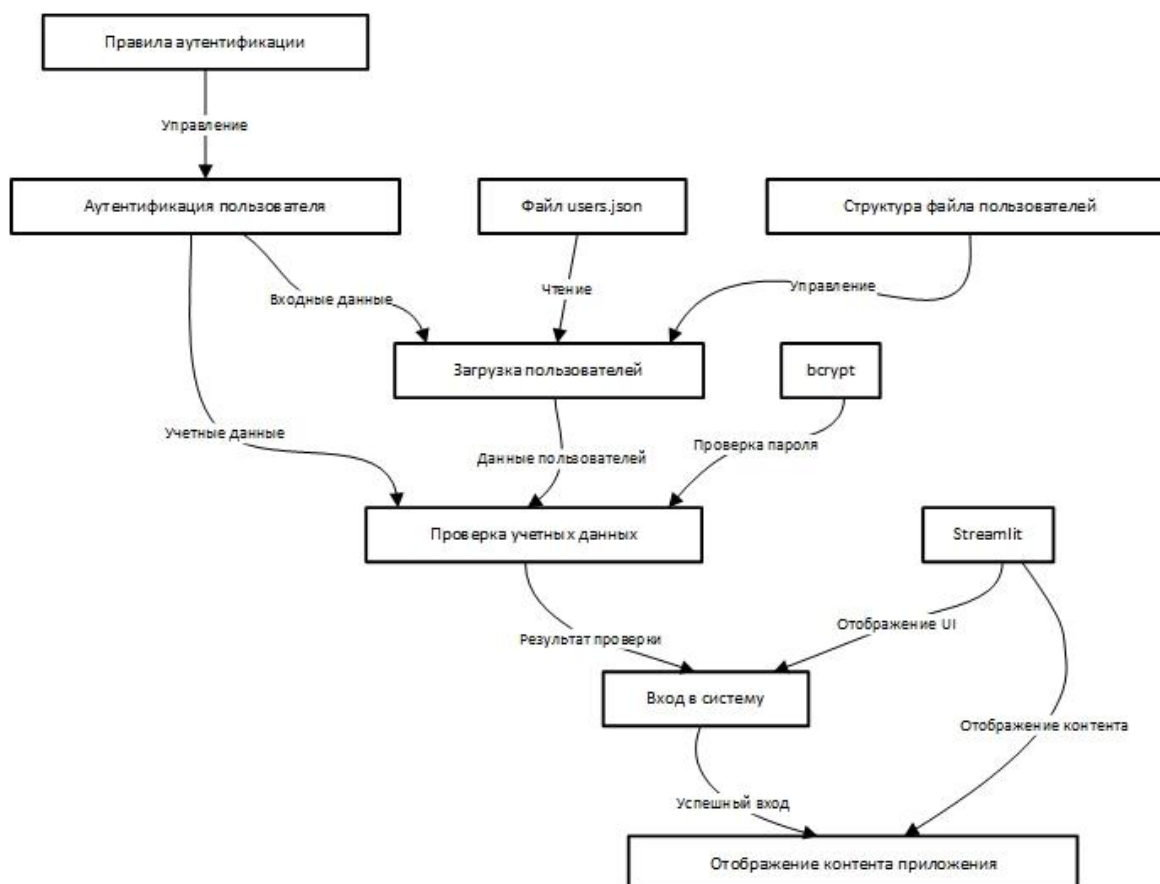


Рис. 1. Ментальная карта (Mind Map) разработки

Рассмотрим разработку системы контроля управления доступом (далее – СКУД) для ИС, которые построены на основе библиотеки Streamlit, для хеширования паролей будет использована библиотека Bcrypt.

В первую очередь, для реализации системы аутентификации потребуется импортировать библиотеки Streamlit, Bcrypt, а также библиотеку для работы с JSON-файлами (применение данных библиотек будет рассмотрено далее более подробно):

```
import streamlit
import bcrypt
import json
```

Рассмотрим шифрование (хеширование) паролей при помощи библиотеки bcrypt. Основное преимущество bcrypt заключается в том, что она использует медленный хеш (время выполнения увеличивается для предотвращения атак методом полного перебора) [8].

Процесс хеширования. Когда пользователь регистрируется, пароль преобразуется в хеш с помощью метода `bcrypt.hashpw()`. Этот метод генерирует случайные данные и объединяет их с паролем для создания стойкого к атакам хеша. Хешированный пароль сохраняется в файл (или базу данных) вместо реального пароля.

Пример хеширования: `hashed_password = bcrypt.hashpw(password.encode('utf-8'), bcrypt.gensalt()).decode('utf-8')`. Здесь: `bcrypt.gensalt()` – генерирует уникальные случайные данные (в некоторой литературе для этого используется термин «Соль»); `Bcrypt.hashpw()` – создает хеш, комбинируя «Соль» и пароль; `Decode('utf-8')` – переводит байтовый объект в строку для удобства хранения (выбран тип Unicode-стандарта `utf-8`).

Проверка пароля. Когда пользователь вводит пароль для аутентификации, то его пароль преобразуется в байты и сравнивается с хешем, хранящимся в файле: `bcrypt.checkpw(password.encode('utf-8'), stored_password_hash.encode('utf-8'))`. Этот метод берет ввод пользователя, хеширует его и проверяет, совпадает ли результат с ранее сохранённым хешем. Таким образом, система никогда не хранит реальные пароли, а использует только безопасные хеши.

Использованные паттерны проектирования. Паттерн «Стратегия» позволит отделить конкретную логику (аутентификацию) от основной логики приложения [9]. Данный паттерн может быть реализован в упрощённом виде. Логика аутентификации может быть вынесена в отдельную функцию (например, назовем ее `authenticate()` и рассмотрим процесс ее создание далее более подробно). Выделение функциональности от основной бизнес-логики позволяет легко изменять или расширять процесс аутентификации без изменения основной логики приложения.

Если потребуется заменить способ аутентификации, например, на «*Oauth*» или «*JWT*», это можно сделать, не трогая основной код приложения.

Разработанный алгоритм для функции `authenticate()` представлен далее на рисунке 2.

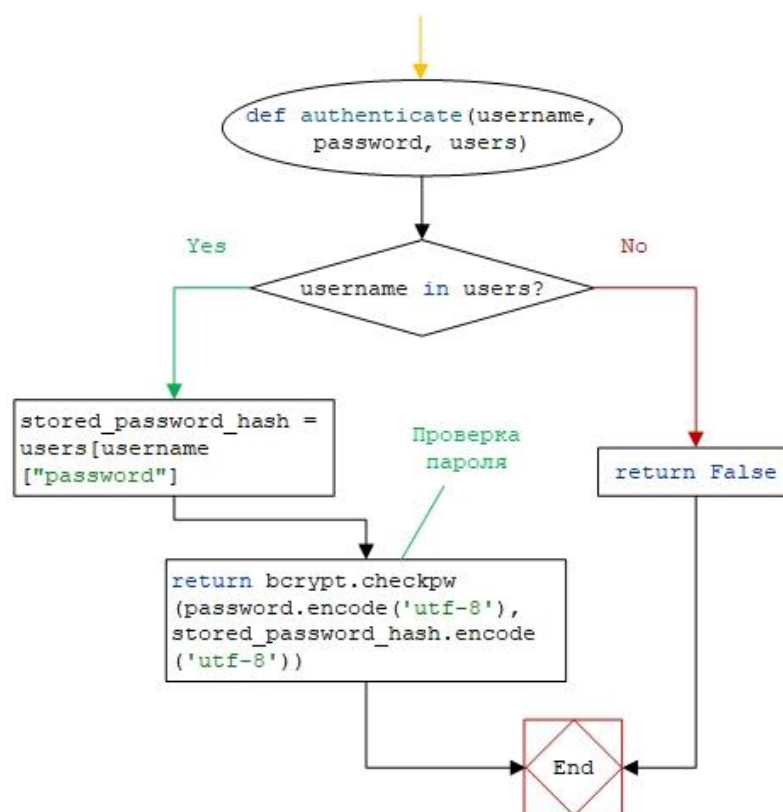


Рис. 2. Реализация функции для аутентификации

Преимуществом такого подхода будет то, что функция «*authenticate*» может легко заменить свою логику на другие методы (например, базу данных), сохранив интерфейс аутентификации.

Применение принципа «Разделение ответственности». Практическое применение принципа «Разделение ответственности» было использовано при разделении функциональности системы на независимые компоненты [10, 11]. Логика приложения может быть разделена на отдельные функции.

«*main()*» – отвечает за отображение интерфейса и взаимодействие с пользователем. Алгоритм для данной функции был реализован следующим образом (рисунок).

«*authenticate()*» – уже была рассмотрена ранее, отвечает за проверку учетных данных.

«*register_user()*» – обрабатывает регистрацию новых пользователей.

«*load_users()*» – отвечает за загрузку пользователей из файла.

Благодаря данному подходу будет упрощена поддержка кода, он станет более систематизированным и разделенным на отдельные составляющие. Например, если нужно будет изменить способ хранения пользователей (например, вместо JSON использовать БД), это можно будет сделать, не изменяя другие частей разработанной СКУД.

Далее рассмотрим более подробно работу функций с файловой системой.

Алгоритм работы с файловой системой – загрузка и сохранение данных в файл. При разработке представленного алгоритма были рассмотрены результаты исследования, представленные в работе [8], а именно: результаты анализа по использованию алгоритма *bcrypt* при хешировании, добавление «соли» при шифровании и подходы для хранения хешированных паролей. Для данного алгоритма была разработана функция *load_users()*. Загрузка данных пользователей из JSON-файла в функции *load_users()* может быть реализована при помощи ключевого слова «*with*» и реализована как:

```
with open(file_path, "r") as file:  
    users = json.load(file)
```

в представленном фрагменте используется *json.load()* для чтения содержимого файла и преобразования его в словарь. Так же была разработана функция *register_user()*, которая позволяет Администратору добавлять новых пользователей и сохранять их в файл. Также данная функция проводит проверку записей в файле JSON для исключения повторяющихся записей. Чтение файла JSON реализовано с помощью стандартных средств Python:

```
with open(file_path, "w") as file:  
    json.dump(users, file)
```

использование *json.dump()* записывает словарь пользователей обратно в JSON-файл.

После загрузки списка пользователей функция проверяет, есть ли уже пользователь с введенным логином в загруженных данных. Если пользователь с таким логином уже существует, программа выдает предупреждение с помощью *st.warning()*, и регистрация прекращается.

Это реализовано при помощи проверки на наличие ключа в словаре. Словарь *users* содержит логины пользователей как ключи, а пароли – как значения. Проверка осуществляется следующим образом:

```
if username in users:  
    st.warning(«Имя пользователя уже существует!»)
```

Данный подход помогает предотвратить создание дубликатов пользователей с одинаковыми именами. Полная версия алгоритма функции *register_user()* представлена далее на рисунке 3. В данной функции применен упомянутый ранее подход для хеширования паролей, а также возможность добавления нового пользователя в словарь. Преимуществами данного алгоритма будут обеспечение простоты хранения данных и независимость от сложных систем управления базами данных.

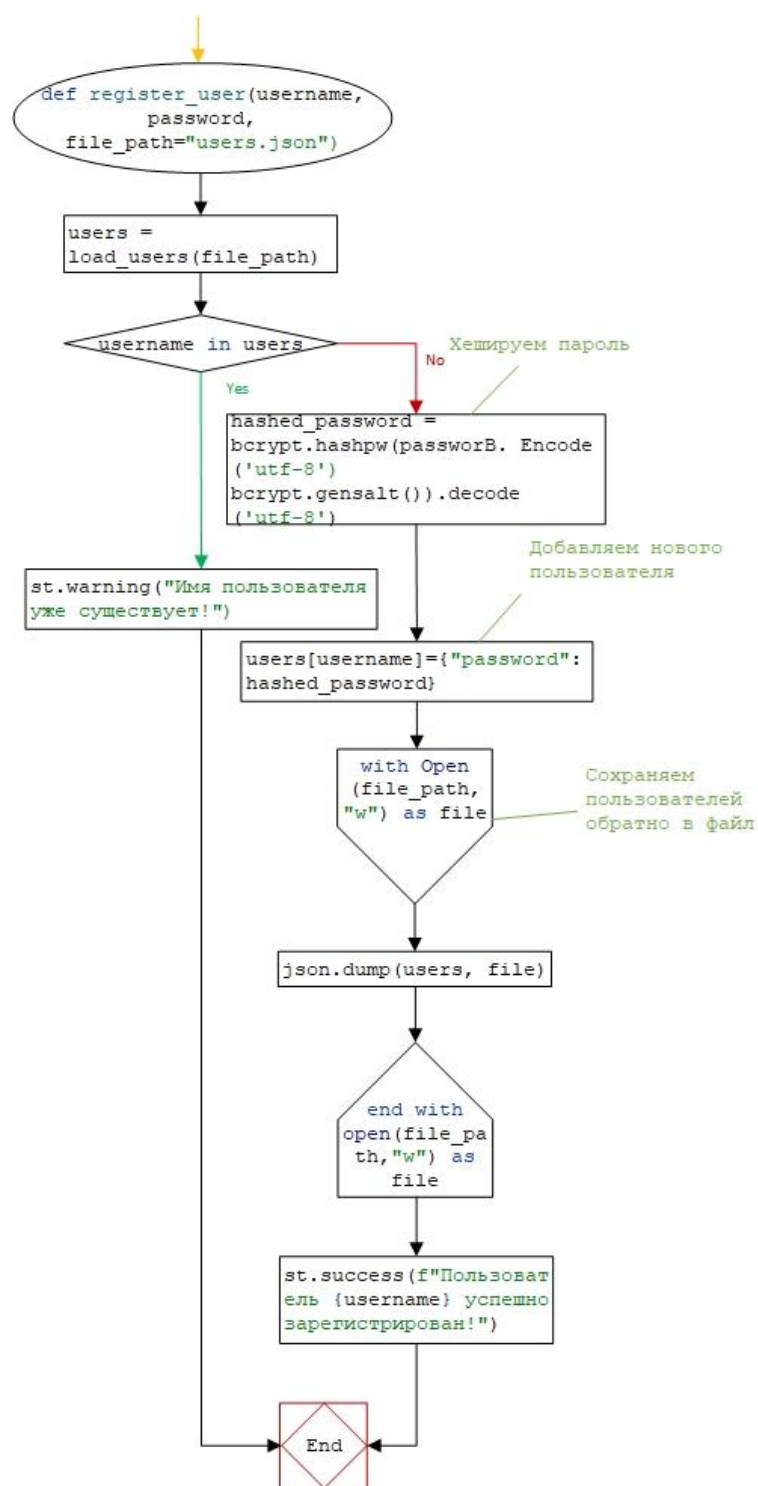


Рис. 3. Алгоритм для реализации функции регистрации новых пользователей

Разработка форм ввода и пользовательского интерфейса. Разработка модуля авторизации пользователей на основе личных данных в веб приложении на Streamlit, была упомянута в работе [12], однако, его создание в данном исследовании не было раскрыто. В представленном разделе будет рассмотрено создание визуализации пользовательского интерфейса для ввода логина и пароля, а также их привязка к внутренней архитектуре рассмотренной разработки и алгоритмам шифрования.

Интерфейс ввода логина и пароля представлен далее (для удобства он был размещен в боковой панели («sidebar»)):

```
username = st.sidebar.text_input("Имя пользователя")
```

```
password = st.sidebar.text_input("Пароль", type='password')
```

– здесь используются текстовые поля и функция *Streamlit* для создания безопасного поля ввода пароля с `type='password'`.

Кнопка «Войти» проверяет введенные данные и вызывает функцию аутентификации:

```
if st.sidebar.button("Войти"):
```

```
    if authenticate(username, password, users):
```

```
        st.sidebar.success(f"Добро пожаловать, {username}!")
```

Streamlit API также упрощает организацию интерфейса через использование блоков с основным содержимым, разделяя интерфейс на отдельные логические компоненты (панель авторизации и основная часть приложения) (рисунок 4).

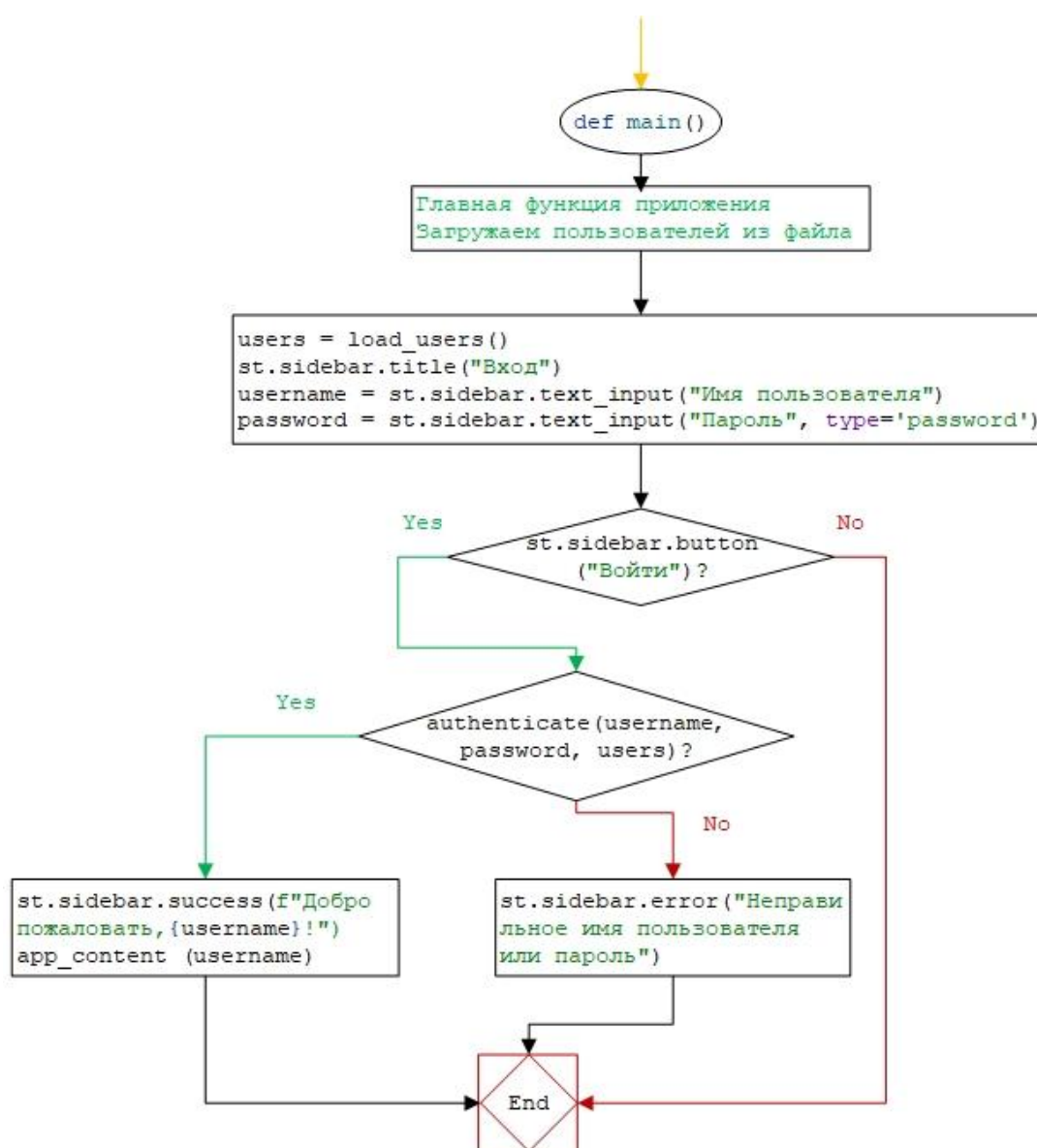


Рис. 4. Реализации функции для создания пользовательского интерфейса

Обработка исключений и ошибок. Для защиты от ошибок, например, если файл с пользователями не найден, используется обработка исключений. Это важная часть защиты программы от непредвиденных ситуаций. В функции *load_users()* это было реализовано при помощи связки из ключевых слов «try-except»:

```
try:
    with open(file_path, "r") as file:
        users = json.load(file)
except FileNotFoundError:
    users = {}
```

В случае отсутствия файла с пользователями – будет создаваться пустой словарь, предотвращая сбой приложения. В итоге алгоритм функции *load_users()* выглядит следующим образом (рисунок 5).

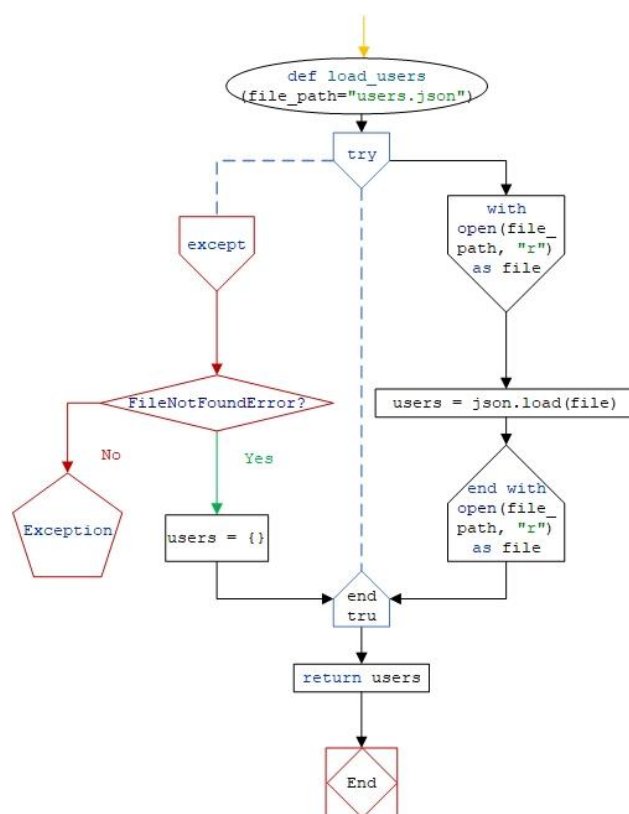


Рис. 5. Алгоритм для функции *load_users()*

Работа кода будет складываться из следующих шагов.

1. При запуске приложения через Streamlit отображается боковая панель для ввода.
2. Пользователь вводит логин и пароль, и при нажатии кнопки «Войти» вызывается функция *authenticate()*, которая проверяет данные через хеширование с помощью библиотеки *bcrypt*.
3. Если введенные данные верны, пользователь получает доступ к основному содержимому приложения.
4. Вся информация о пользователях хранится в файле *users.json* в зашифрованном виде.
5. Регистрация новых пользователей выполняется через отдельную функцию *register_user()*, которая хеширует пароль и добавляет нового пользователя в файл.

Так как запуск ИС происходит через файл домашней страницы («*Home.py*») то наиболее подходящим решением может стать размещение разработанного скрипта в данном файле.

Асинхронность для представленной разработки в данном случае не рассматривалась, а вставку разработанного скрипта, который реализует систему аутентификации пользователей, оптимальнее всего добавить сразу после импортирования всех нужных библиотек. Таким образом, система аутентификации будет запущена в первую очередь при загрузке домашней страницы.

Система аутентификации реализована таким образом, что при первом входе через домашнюю страницу (*Home.py*), учетная запись будет сохранена на протяжении всего времени работы с ИС (либо до очистки кэша) т.е. при переходе на *Home.py* с других вкладок после прохождения аутентификации повторного запроса логина и пароля не будет.

Администрирование и разработка UML-диаграммы последовательностей СКУД. Отдельным вопросом следует рассмотреть добавление новых пользователей в систему аутентификации. Организация системы аутентификации с позиций пользователя и администратора может быть организована следующим образом: Администратор ИС создает уникальные логин и пароль, которые передает Пользователю и добавляет в скрипт домашней страницы. После чего, происходит хеширование данных и их запись в файл JSON.

Добавленные логин и пароль в код домашней страницы в последующем могут быть удалены: это никак не повлияет на последующий вход в ИС пользователей (предварительно, перед удалением, данные могут быть дополнительно сохранены т.е. может быть сделана резервная копия). Удаление учетной записи может производиться путем нахождения и удаления логина и хешированного пароля непосредственно в самом файле JSON (помимо файла JSON может быть использована и БД). Пример заполнения файла JSON данными логина и хешированного пароля представлено далее на рисунке 6 (на примере логинов «*user1*», «*admin*»).

```
{
  "user1": {
    "password": "$2b$12$e1xZ0NUdpXRZ7bXht.5xM.cXZl0c5vQrfr6nLTvcKfhxu8QMeS5C."
  },
  "admin": {
    "password": "$2b$12$6uTvrS9erQ03j.MKNF70EePIay9P6kl4YBe5SzC/.x0qw7x0dKXaK"
  }
}
```

Рис. 6. Пример записи хешированных паролей в файл их хранения JSON

Рассмотрим более подробно непосредственно способы регистрации новых пользователей. Здесь можно выделить два способа.

Способ 1: использование функции «*register_user*» напрямую т.е. можно вручную зарегистрировать пользователя, вызвав функцию «*register_user*» в отдельной части программы или интерактивно в Python-скрипте. Например, если нужно добавить пользователя с логином «*user1*» и паролем «*password1*», можно временно добавить блок кода:

```
if st.sidebar.button(«Зарегистрировать нового пользователя»):
    register_user(“user1”, “password1”)
```

далее запустить домашнюю страницу и нажать кнопку регистрации в боковой панели. После этого пользователь «*user1*» с паролем «*password1*» будет зарегистрирован, и его данные сохранятся в файле *users.json*.

Способ 2: вызов функции вручную. Можно временно вызвать функцию «*register_user*» вне основного кода программы. Для этого, после блока «*if __name__ == '__main__':*» перед «*main()*» следует вызвать данную функцию с нужными логином и паролем, например: «*register_user('user1', 'password1')*». Далее, после записи данных в файл JSON, представленная строка с логином и паролем может быть удалена.

Рассмотрим представление полученных результатов при помощи UML-диаграммы последовательностей. Актуальность и особенности использования UML моделей для исследования и обеспечения информационной безопасности была обоснована в опубликованных ранее работах отечественных и зарубежных авторов [13]. UML-диаграмма последовательностей для проводимого в данной статье исследования представлено на рисунке 7 далее.

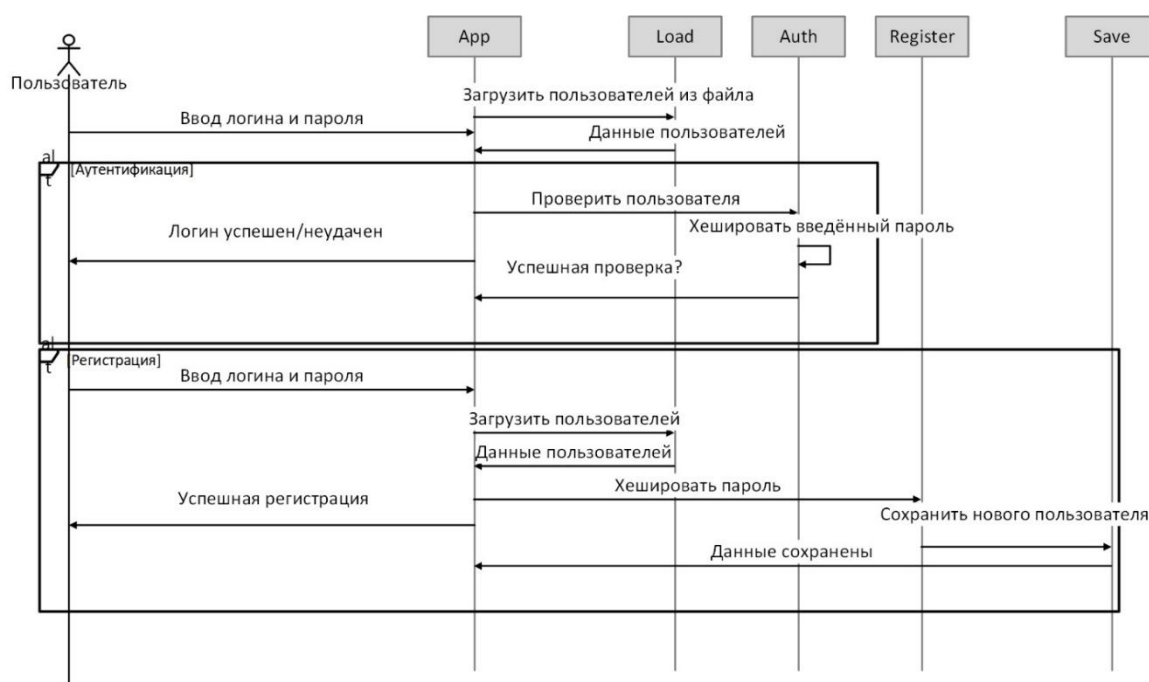


Рис. 7. UML-диаграмма последовательностей для разработанной СКУД

Разберем представленную UML-диаграмму последовательностей более подробно. Актор: Пользователь – взаимодействует с приложением библиотеки *Streamlit*. Далее организован основной поток для аутентификации, который проявляется в следующих шагах: пользователь вводит логин и пароль в приложение; приложение загружает список пользователей из файла через компонент *Load*; компонент аутентификации (*Auth*) проверяет наличие пользователя и хеширует введенный пароль, происходит сверка паролей. И если проверка успешна, пользователь авторизован, иначе – отказ.

Альтернативный поток для регистрации следующий: пользователь вводит новый логин и пароль; далее приложение снова загружает список пользователей через компонент *Load*; новый пароль хешируется через компонент *Register*; после чего новый пользователь сохраняется в файл через компонент *Save*; пользователю сообщается об успешной регистрации. Особенности данной UML-диаграммы следующие. Первое – диаграмма содержит альтернативные блоки (*alt*), которые показывают два различных потока – для аутентификации и регистрации; второе – взаимодействие между компонентами приложений *Streamlit* и вспомогательными функциями, такими как загрузка и сохранение данных.

Таким образом, благодаря разработанной UML-диаграмме последовательностей было рассмотрено графическое проектирование представленных примеров для разработки SKUД.

Заключение. В работе представлен подход к разработке и реализации системы аутентификации пользователей, ориентированной на использование в веб-приложении. Проанализированы ключевые аспекты функциональности, включая регистрацию новых пользователей, аутентификацию существующих, безопасное хеширование паролей, а также управление пользовательскими данными с использованием файлового хранилища в формате JSON.

В работе были рассмотрены: особенности шифрования паролей и их программная реализация; применение функционального подхода и практическая реализация паттернов проектирования «Стратегия», «Разделение ответственности»; примеры работы с файловой системой (для загрузки и сохранения данных в файл); разработка пользовательских интерфейсов и форм ввода; обработка исключений и ошибок; администрирование системы. Полученные результаты были отражены при помощи – UML-диаграммы, ментальной карты (Mind-Map), фрагментов и примеров кода, примера хранения зашифрованных паролей в файле. Представлены примеры использования библиотек *VsCrypt* (для шифрования паролей), *Streamlit* (создание интерфейсов, интеграция в web-приложение), *JSON* (для записей в файл хранения).

Практическая значимость представленной разработки заключается в возможности без каких-либо значимых изменений в исходном коде интегрировать систему аутентификации пользователей с функцией администрирования в веб-приложения и информационные системы, созданные на основе библиотеки *Streamlit* (включая веб-приложения для научных исследований, обработки статистических данных, а также разработки и использования моделей машинного обучения). В качестве продолжения работы могут быть рассмотрены системы многофакторной аутентификации для повышения уровня безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gholizadeh, S. Top Popular Python Libraries in Research / S. Gholizadeh // Journal of Robotics and Automation Research. – 2022. – Vol. 3, No. 2. – P. 142-145. – DOI 10.33140/jrar.03.02.02. – EDN GLBISU.
2. Chiang, R. C. Contention-aware container placement strategy for docker swarm with machine learning based clustering algorithms / R. C. Chiang // Cluster Computing. – 2023. – Vol. 26, No. 1. – P. 13-23. – DOI 10.1007/s10586-020-03210-2. – EDN SWQZXV.
3. Taufik A. I. Web Application Based on MachineLearning for Diabetes Detection usingMicrostrip Resonator and Streamlit / A. I. Taufik, Y. Rahayu, A. Setiawan // Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics. – 2024. – Vol. 6, No. 3. – P. 120-131. – DOI 10.35882/ijeeemi.v6.i3.2. – EDN TPLKYH.
4. Akkem, Ya. Streamlit Application for Advanced Ensemble Learning Methods in Crop Recommendation Systems – A Review and Implementation / Ya. Akkem, B. S. Kumar, A. Varanasi // Indian Journal of Science and Technology. – 2023. – Vol. 16, No. 48. – P. 4688-4702. – DOI 10.17485/ijst/v16i48.2850. – EDN QFZSPO.
5. Нурматов, М. Ш. Обеспечение безопасности веб-приложений на основе использования JWT в Lumen с использованием Swagger / М. Ш. Нурматов, А. Н. Скоба // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития : Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции, Уфа, 04 апреля 2023 года. Том Часть 3. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2023. – С. 196-206. – EDN RSALAH.
6. Свиноухов, Д. Д. Сравнение существующих алгоритмов хеширования / Д. Д. Свиноухов, А. В. Абрамов, Э. Х. Милушев // Наукосфера. – 2024. – № 5-1. – С. 71-74. – DOI 10.5281/zenodo.11185942. – EDN BDZLJS.

7. Лейн, Ф. Е. Исследование методов хранения пользовательских паролей и их синхронизации на мобильных устройствах / Ф. Е. Лейн // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 5(74). – С. 512-522. – EDN ISTUTJ.
8. Batubara, T. P. Analysis Performance BCRYPT Algorithm to Improve Password Security from Brute Force / T. P. Batubara, S. Efendi, E. B. Nababan // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1811, No. 1. – P. 012129. – DOI 10.1088/1742-6596/1811/1/012129. – EDN TTSZOX.
9. Шмаков, С. Э. Взаимодействие паттернов проектирования для эффективной web-разработки / С. Э. Шмаков, Е. В. Щенникова, А. Е. Определенцева // Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. – 2021. – № 2. – С. 90-96. – EDN YQJJOH.
10. Федорова, О. Single Responsibility Principle / О. Федорова // Системный администратор. – 2024. – № 1-2(254-255). – С. 62-63. – EDN ZHTWLW.
11. Дехтиевский, С. А. Принципы SOLID и их применение в разработке программного обеспечения / С. А. Дехтиевский, Г. С. Бударный // Научный аспект. – 2024. – Т. 43, № 4. – С. 5635-5641. – EDN RBCDIR.
12. Радковский, С. А. Использование фреймворка Streamlit для создания виртуальных лабораторных работ в виде веб-приложений / С. А. Радковский, Г. В. Коваленко // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2024. – № 4(75). – С. 61-72. – EDN TDRGYB.
13. Meziane, H. A Study of Modelling IoT Security Systems with Unified Modelling Language (UML) / H. Meziane, N. Ouerdi // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2022. – Vol. 13, No. 11. – DOI 10.14569/ijacsa.2022.0131130. – EDN SMPDJQ.

Поступила в редакцию 19.09.2025 г., рекомендована к печати 08.10.2025 г.

ALGORITHMS FOR IMPLEMENTING USER AUTHENTICATION FOR WEB APPLICATIONS BASED ON THE STREAMLIT LIBRARY

Ponomarev D.S.

Streamlit is a relatively new, rapidly developing library that focuses on developing and deploying web applications for scientific research, machine learning, and statistical data analysis. However, to date, there are no ready-made solutions for user authentication for this library, which may be a serious issue when developing software products that support user privacy or limited user access. Therefore, the goal of the study was to develop algorithms and approaches for creating a user authentication system with the ability to administer (taking into account the possibilities of integration into web applications created on the basis of Streamlit). The main focus of the work was on ensuring security through password hashing using the Bcrypt library and managing user data through file storage in JSON format. Options for administering the developed system with the ability to provide access restrictions for certain users are considered. Key aspects of the system architecture are presented, including user registration, authentication, data management, and writing to a JSON file. The presented examples use a functional approach: the development of both functions and individual components of the developed system, their interaction with each other, as well as their algorithmic implementation are considered. The application of well-known design patterns and system design, error handling are considered. Examples of recording encrypted passwords in a storage are given. The results of the presented work include the development of the authentication system architecture, password encryption algorithms, account management methods and their integration into web applications. The practical usefulness of the presented development lies in the ability to integrate (without any significant changes in the source code) the user authentication system into an application or information system based on the Streamlit library (in particular, these can be systems for conducting scientific research, working with statistical data or creating and using machine learning models).

Keywords: access control systems, design patterns, encryption algorithms, Python, Bcrypt, Streamlit.

Пономарёв Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», доцент кафедры водоснабжения и водоподготовки ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.
E-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

Ponomarev Dmitrii Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Associate Professor of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕДАКТОРА ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

© 2025 Филипишин Д.А., Григорьев А.В.

Предложен новый подход к построению онтологий, расширение машины вывода логикой троичных предикатов и модификация инструментов редактора онтологий в интегрированную среду разработки (IDE). В статье рассматриваются возможности редактора онтологий Protégé и Ontorion Fluent Editor на примере построения онтологии общеизвестной «загадки Эйнштейна», как основа построения дескриптивных онтологий (OWL). Описаны теоретические основы предлагаемых модификаций, а также конкурентные преимущества практического применения предлагаемых методов.

Ключевые слова: онтология, аксиома, факт, триплет, концепт, объект, субъект, отношение, экземпляр класса, dl query, SPARQL, OWL.

Введение. Системы программного обеспечения не существуют изолировано от окружающего мира. Они эксплуатируются в определенной социальной и организационной среде, поэтому системные требования должны разрабатываться с учетом этой среды. Многие представленные на рынке программные системы практически не имеют спроса именно потому, что не учитывают важности социальных требований [1].

Среди множества разделов искусственного интеллекта, в эпоху экспоненциального развития нейросетей, онтологии выделена небольшая ниша развитой семантической сети, чаще всего требующая знания эксперта и имеющая довольно сложный порог вхождения для неподготовленного пользователя. Онтология в контексте искусственного интеллекта – это формальное представление знаний о предметной области, использующее концептуальную схему для организации понятий, их свойств и отношений. Таким образом необходимы средства, позволяющие расширить возможности онтологии для решения рутинных задач, как альтернативу нейронным сетям и средства расширения существующих инструментов разработки, которые требуют логических рассуждений.

Актуальность проблемы. В последние годы разработка онтологий – явное формальное описание терминов предметной области и отношений между ними – переходит из мира лабораторий по искусственному интеллекту на рабочие столы экспертов по предметным областям. Во всемирной паутине онтологии стали обычным явлением, что означает необходимость появления средств, позволяющих решать рутинные задачи на основе семантических описаний, отличных от нейросетей.

В широком смысле онтологическая модель – это база данных в концепции открытого мира. Система не может доказать истинность или ложность утверждения если об этом ничего не сказано, в то время как в классической базе данных такое исключение трактуется как ошибка (false).

Работа выполнена в рамках молодежной научной лаборатории «Искусственный интеллект» (код НИОКТР FRFR-2024-0010)

Онтология в наше время [2] не имеет четкого определения и как показал анализ трудов, в разных источниках трактуется по-разному. Под определение онтологии попадают и многие другие понятия, в том числе и иерархия классов в ООП, концептуальные карты, семантические сети, словари с определениями, таксономия, тезаурусы (таксономия в терминах) и т.п.

Применение онтологий в различных информационных системах (ИС) достаточно широко исследовано. Основная цель онтологического подхода предложить схему, способную выполнять задачи через интуитивно понятный интерфейс, позволяющий опытным и менее опытным пользователям взаимодействовать с ней легко и комфортно. Тем не менее, на текущий момент, процесс создания онтологий имеет ряд недостатков. Некоторые авторы указали на ряд проблем, возникающих при подборе существующих онтологий, тяжело, а иногда, и невозможно найти подходящую онтологию из числа существующих под конкретные задачи. С другой стороны, создание новой онтологии является сложным и достаточно дорогостоящим процессом [2].

Применение онтологий для разработки программного обеспечения потенциально позволяет решить задачу расширения фундаментальных инструментов проектирования. Следовательно, имеет место актуальная задача модернизации существующих инструментов построения онтологий в интегрированную среду разработки (IDE).

Постановка задачи. Целью предлагаемой работы является разбор решения общеизвестного примера «загадки Эйнштейна» в редакторе онтологий Protégé, с последующим изложением модификаций существующих инструментов и описанием преимуществ их применения. А именно, модернизация существующих инструментов построения онтологий в интегрированную среду разработки (IDE).

IDE (Integrated Development Environment) интегрированная среда разработки – комплекс программных средств, используемый программистами для разработки программного обеспечения. IDE объединяет инструменты для написания, тестирования и отладки кода в одном интерфейсе, что упрощает процесс разработки.

К модификации редактора онтологий в IDE следует подходить в рамках этнографического подхода, т.е. ориентируясь на потребности конечного пользователя. Этнографический подход к формированию системных требований используется для понимания и формирования социальных и организационных аспектов эксплуатации системы. Этнографический подход, в той или иной степени, необходим при проектировании любой программной системы, в том числе для рассматриваемого редактора онтологий, которая ориентирована на достаточно большую аудиторию. Редактор онтологий, ориентированный на конечного пользователя, это не просто программная система, ориентированная на поиск знаний, это своего рода тип «умной» графовой базы данных (NoSQL).

Среди задач, решаемых онтологиями, был сделан акцент на организации предметной области знаний в виде концептуальной схемы для программистов, т.е. снизить порог вхождения и оптимизировать под рутинные задачи, свойственные нейронным сетям. Для достижения этой цели оптимально отойти от научного изучения общества через язык (семиотика, построенная на трудах лингвиста Франца де Соссюра, получившая свое развитие в семиотической модели «треугольник Фреге») [3] и представить онтологию, ориентируясь не на смысл, а - на знак, который обязательно должен иметь смысл (семиотика, построенная на трудах Чарльза Сандерса Пирса, которая получила свое развитие в семиотической модели «квадрат Пospelова») [4].

Семантический треугольник Г. Фреге [3] основан на трактовке логического символизма как универсального языка, поэтому невозможно сказать что-либо вне рамок самой системы, имеющей план выражения, сигнификат и денотат. Явления социальной действительности интерпретируются как «существование в мире» посредством языковых (знаковых) структур и представляются тройной категоризацией: вещь – событие – произведение. Для онтологии этот вид семиотики отражается в том, что индивид может не иметь класса, т.к. не создается как экземпляр какого-либо класса.

Квадрат Пospелова [4] включает в себя:

- метазнак, определяющий имя семиотической системы (множество знаков-символов);
- синтаксис, определяющий правила построения знаковой системы;
- семантику, определяющую смысл;
- прагматику, определяющую основные действия, которые возможно выполнить в рамках этой семиотической системы.

Таким образом, ключевое изменение при переходе из языковой семантики в знаковую, это ввод ограничений «слишком» открытого мира:

- каждый индивид создается как экземпляр какого-то класса и не может существовать отдельно;
- работать с описанными данными, либо дополнительно создавать ограничения для работы с группой или подмножеством существующих классов или индивидов (отмена потребности описания перечислений индивидов для классов);
- перенести логику обработки запросов на аксиоматику предикатов, а не аксиоматику классов-концептов.

Для анализа возможностей инструмента онтологии был выбран редактор онтологий Protégé. Этот редактор имеет исчерпывающую документацию, поддерживается значительным сообществом, состоящим из разработчиков и ученых, правительственных и корпоративных пользователей, использующих его для решения задач, связанных со знаниями. Protégé доступен для свободного скачивания с официального сайта вместе с плагинами и онтологиями [5].

Этот редактор основан на фреймовой модели представления знания ОКВС (Open Knowledge Base Connectivity) и снабжен рядом плагинов, что позволяет адаптировать его для редакторов моделей в разных форматах [6].

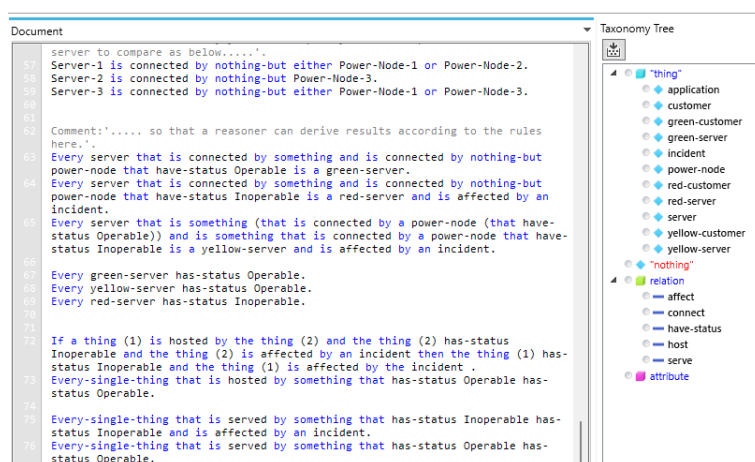


Рис. 1. Представление онтологии в редакторе Ontorion Fluent Editor 2015

В качестве альтернативного взгляда на инструмент онтологии был выбран редактор онтологий от польских разработчиков Ontorion Fluent Editor (рис.1), который имеет скриптовое управление и возможность использовать в работе реальный английский, но не умеет обрабатывать отрицания предикатов и довольно скупо поддерживает основные возможности OWL, имея лишь аналог DL-Query. Разработчики предлагают, как альтернативу возможность скачать разработанную онтологическую модель в OWL, затем открыть в нужном редакторе и доработать. Также редактор поддерживает продукции (IF...THEN...), в отличии от Protégé.

Формальное определение онтологии. Выполним анализ формальных моделей согласно их историческому изменению: RDF, RDFS, (DAML+OIL), OWL, OWL2.

Формальная модель онтологической системы [7]:

$$\Sigma^O = \langle O^{meta}, O^{d\&t}, \Xi^{inf} \rangle, \quad (1)$$

где O^{meta} – онтология верхнего уровня, в которой описаны все основные концепты предметной области (чаще всего метаонтология DBpedia [7], классы в которой нельзя применять для создания индивидов, но можно настраивать эквивалентность с помощью механизма «running». Классы в DBpedia являются абстракцией высшего уровня); $O^{d\&t}$ – множество онтологий предметной области; Ξ^{inf} – модель машины вывода.

Онтологическая система также представлена стандартом онтологического исследования IDEF5. В целом стандарт IDEF5 предоставляет структурированную методологию, с помощью которой можно наглядно и эффективно разрабатывать, поддерживать и изучать онтологию, а набор этих инструментов, по сути, и является онтологией системы. Методология IDEF5 обеспечивает наглядное представление данных, полученных в результате обработки онтологических запросов в простой естественной графической форме. Также имеет в своем арсенале 2 языка:

- схематический язык (Schematic Language-SL) – является визуальным и использует графические элементы, где классы-концепты отображаются кружочками, а связи между ними линией (рис.2);
- язык доработок и уточнений (Elaboration Language-EL) – язык представления в виде структурированного текста.

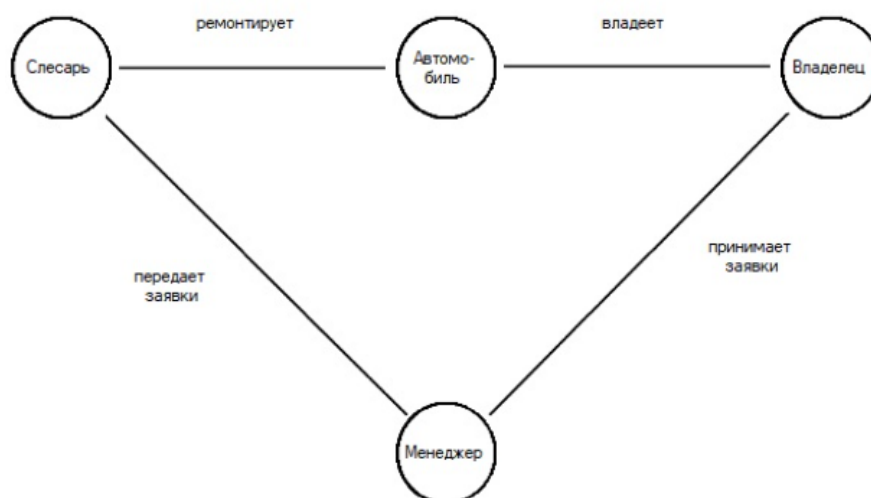


Рис. 2. Графическое отображение IDEF5 [8]

Язык SL позволяет строить разнообразные типы диаграмм и схем в IDEF5. Основная цель всех этих диаграмм - наглядно и визуально представлять основную онтологическую информацию. Всего существует четыре основных вида схем, которые наглядно используются для накопления информации об онтологии в достаточно прозрачной графической форме:

- диаграмма классификации – для логической систематизации знаний, накопленных при изучении системы;
- композиционная схема – для наглядного отображения состава объектов, относящихся к тому или иному классу-концепту;
- схема взаимосвязей – для отображения зависимостей между самими же классовыми взаимосвязями;
- диаграмма состояния объекта – для документирования процесса с точки зрения изменения состояния объекта.

Диаграмма состояний (рис.3) является попыткой реализовать пространственно-временную логику в рамках онтологии, но ограничена несколькими состояниями описываемого объекта без учета временных отрезков, позволяя лишь описать эволюционные изменения объекта в целом.



Рис. 3. Диаграмма состояний IDEF5 [8]

Следовательно, на текущий момент онтологическая система в целом представлена с одной стороны концепцией «глобального описания» (1), в которой основные термины описаны в метаонтологиях по типу DBpedia, далее подгружаются в текущую онтологию предметной области, и с другой, стандартом нотации IDEF5. Также можно сделать вывод, что методы реализации инструмента онтологической системы (1) развивались отдельно от стандарта нотаций IDEF5, т.к. явно видны различия в подходах описания, особенно в наличии диаграммы состояний, которой на сегодняшний день нет ни в каком виде в рассматриваемых редакторах Protégé, Ontorion Fluent Editor и других не коммерческих версиях.

Рассмотрим языки описания онтологий.

Языки представления знаний [2] или языки описания онтологий, имеют весьма важное значение в управлении знаниями. На сегодняшний момент выделяют три основных класса языков описания онтологий:

- традиционные языки спецификации онтологии (KIF, Ontolingua, CycL, LOOM, OKBC, OCML, Flogic);
- языки, основанные на web-стандартах (XOL, SHOE, UPML, XML);
- специальные языки для обмена онтологией через web (RDF, RDFS, DAML, OIL, OWL).

Для рассмотрения истории развития формальной модели онтологии остановимся на языках RDF, RDFS, OWL и OWL2. На это решение повлияли возможности этих языков описания онтологий, их последовательное развитие методом усложнения существующих средств или введения новых. А также потому, что эти языки включают все лучшее, что на текущий момент было реализовано в семантических сетях.

Формальная модель базовой (фундаментальной) онтологии [9] RDF:

$$O = \langle K, O, A \rangle, \quad (2)$$

где K – множество концептов (понятий, терминов) предметной области; O – множество отношений между концептами; A – множество функций интерпретации (аксиоматизации), заданных на концептах и/или отношениях онтологии [9].

В выражении (2) описывается фундаментальная формальная модель онтологии, представленная триплетом «*субъект* → *предикат* → *объект*» на языке RDF (Resource Description Framework). Для каждого описанного множества применяются ограничения: множество должно быть не пустое и множество должно иметь конечное число элементов. Таким образом, можно однозначно определить элементы, которые не являются онтологией:

- при $\langle K, \emptyset, \emptyset \rangle$ — словарь;
- при $\langle K, O, \emptyset \rangle$ — таксономия понятий;
- при $\langle K_1 \cup K_2, \emptyset, \emptyset \rangle$ — тезаурус.

Тезаурусы имеют дерево классов-концептов с множественным наследованием, из-за чего их часто путают с онтологиями, но исходя из описанного ограничения (множества не должны быть пустыми) тезаурусы не являются онтологией, т.к. содержат пустое множество аксиом, что противоречит ограничению в рамках фундаментальной модели онтологии.

Формат RDFS (3) расширяет базовое описание онтологий (RDF) такими инструментами как: иерархия классов (наследование), литералы (аннотация или описание), иерархия отношений, а также указания источника «domain» и значения «range» для бинарных отношений. Также позволяет указывать атрибуты «type» с описанием принадлежности к классу-концепту, т.е. переменные и другие источники данных. Но арифметические операции выполняет не умеет.

Формальная модель расширенной онтологии RDFS:

$$\langle K_1 \cup K_2, O_1 \cup O_2, A \cup \kappa, \alpha, l \rangle, \quad (3)$$

где $K_1 \cup K_2$ – дизъюнкция множеств концептов (понятий, терминов) предметной области; $O_1 \cup O_2$ – дизъюнкция множеств отношений между концептами; $A \cup \kappa$ – дизъюнкция множеств функций интерпретации (аксиоматизации), заданных на концептах и/или отношениях онтологии и множеств, указывающих на классы «субъект» (domain) и «объект» (range), используемые с данным свойством; α – множество атрибутов классов (констант); l – множество литералов (rdfs:label – человекочитаемое имя ресурса, rdfs:comment – текстовый комментарий, rdfs:seeAlso – ссылка на объясняющий ресурс и т.п.).

Для разработки прикладной онтологии [2] чаще всего делают выбор в пользу OWL (Ontology Web Language), т.к. он расширяет RDFS, устраняет ограничения языков DAML и OIL, при построении онтологий можно ссылаться на ранее созданные онтологии, чтобы избежать избыточности и строить интегрированные онтологии.

Налагаемые ограничения языком DAML+OIL: неизменяемость, ограничение доступа к данным, контроль за действиями сторон, ограничение на преобразование данных, ограничение свойства, возможность накладывать ограничения на позиции в определениях классов, установка отношений (симметрично, транзитивно), которые в RDF/RDFS были невозможны и др.

OWL – стандарт консорциума W3C для описания онтологий в семантической паутине, базирующийся на дескриптивной логике – разрешимом фрагменте логики первого порядка с четкими вычислительными свойствами. OWL позволяет формально определять классы, свойства и отношения между ними для веб-ресурсов и произвольных объектов реального мира.

Таким образом, онтологии в моделях [10], основанных на дескриптивной логике (OWL), составляют кортеж:

$$O = \langle C, R, H_c, H_r, I, A \rangle, \quad (4)$$

где C – множество классов; $R: C \times C$ – множество свойств классов; $H_c: C \times C$ – иерархия классов; $H_r: R \times R$ – иерархия отношений; I – множество индивидов; A – множество аксиом над классами и ограничений отношений.

В настоящее время применяется язык описания онтологий OWL2, который не имеет единого стандарта и представлен тремя профилями, каждый из которых налагает определенные ограничения:

- OWL2 EL — оптимизирован для обработки онтологий с большим числом классов и свойств, алгоритмы логического вывода завершаются за полиномиальное время;

- OWL2 QL — ориентирован на онтологии с множеством индивидуальных объектов, обеспечивает логарифмическое время выполнения запросов;

- OWL2 RL — предназначен для интеграции с языками правил, повышает выразительность RDFS- онтологий [11].

Аргументация в OWL (описание логики) [11] основана на том, что известно как предположение об открытости мира (OWA). Предположение об открытости мира означает, что мы не можем предположить, что «что-то» не существует до тех пор, пока четко не будет сказано, что оно не существует. Другими словами, если «что-то» не было сказано, для того чтобы быть фактом, нельзя предположить его ложным — предполагается, что «знания просто не было добавлено к базе знаний».

Классы могут быть описаны с помощью ограничений:

- ограничение квантификатора – классифицируются как экзистенциальные (которые участвуют в, по крайней мере, одном отношении по указанному свойству для отдельных индивидов, которые являются членами указанного класса) и универсальные (имеющих только данное отношение к отдельным индивидам, которые являются членами конкретного класса);

- ограничение мощности – имеют минимальное, максимальное или точно заданное количество отношений с другими индивидами или значениями;

- ограничение переменных – могут быть созданы для уточнения нашего описания класса или ограничения области значений свойств.

Следует отметить, что экземпляр класса в редакторе онтологий создается как индивид, а не как экземпляр какого-либо класса. Поэтому может вовсе не иметь класса и изначально пересекаться с другими индивидами, с целью вывода о том, что некоторые индивиды являются или могут являться эквивалентными друг другу согласно заданным фактам. Такое поведение налагает дополнительные сложности в построении онтологии и делает невозможным ручное построение большой базы знаний с нуля. Рассмотрим машину вывода в редакторах онтологий.

Ризонер (reasoner) в онтологии — машина логического вывода, которая на входе получает граф с логическими аксиомами и выводит новые факты. Основные задачи, которые решает ризонер: классификация сущностей и создание новых связей между ними [10]. Наиболее популярным ризонером в Protégé является HermiT.

Ризонер позволяет получить новые факты или отловить ошибки внутри самого редактора, но не выполняет никаких запросов. Для этой цели применяются такие инструменты как язык запросов похожий на SQL SPARQL и плагин простых запросов DL-query. В системе Protégé для работы с SPARQL используется плагин SPARQL Query, который позволяет составлять и выполнять запросы на этом языке прямо из пользовательского интерфейса программы. Поддержка SPARQL также реализована в версии Fluent Editor 2014 R2. По умолчанию в редакторе есть встроенный движок SPARQL, который позволяет мгновенно исследовать онтологии с помощью запросов к данным.

SPARQL (язык запросов к графу знаний) используется в онтологии для работы с данными, представленными в формате RDF. SPARQL позволяет создавать сложные запросы, которые связывают отношения с данными, фильтруют по критериям и возвращают настраиваемое представление данных, но являются достаточно скромными. Для расширения возможностей предназначены синтаксисы записи правил логического вывода, определяемых пользователем: SWRL, SPIN и SHACL. Правила SWRL исторически возникли первыми и в промышленных применениях практически не используются. Затем появилась нотация SPIN, но на настоящее время актуальной является спецификация SHACL, определяющая способы записи условий проверки консистентности онтологий, и ее расширение SHACL Rules, предназначенное для записи произвольных правил получения новых фактов на основании уже известных. Несмотря на существенно различный синтаксис, идеологически принцип записи правил во всех нотациях весьма схож [12-14].

Для получения простых ответов (протестировать онтологию), можно воспользовавшись плагином DL-Query, с целью построения запросов к онтологии.

DL-Query — плагин для построения запросов к онтологии в программе Protégé. Пример запроса: «Человек and фамилия value "Одицов"». В редакторе Ontorion Fluent Editor запросы выглядят аналогично DL-Query, но вводятся согласно синтаксису CNL. Например, «*Who Or What has weight lower than 400?*», что предоставляет значительные преимущества в использовании упрощенного естественного языка для запросов к онтологии.

Синтаксис CNL (Controlled Natural Language) — это правила, которые определяют структуру фраз, предложений и текстов в контролируемом естественном языке (упрощённом естественном языке). CNL — ограниченная версия естественного языка, созданная для выполнения определённых задач [13].

Далее онтология будет рассматриваться только как «весомая» (содержащая аксиомы) основанная на дескриптивной логике (OWL), согласно классификации Юрия Роландовича Валькмана, описанной в его труде «Онтологии: формальное и неформальное» и представленная кортежем в выражении (4).

Построение онтологии для решения загадки Эйнштейна. В качестве примера для рассмотрения методов и средств редакторов онтологий был выбран общеизвестный пример «загадка Эйнштейна» (рис.4). Задача Эйнштейна (загадка Эйнштейна, головоломка о зебре) — логическая задача, по легенде созданная Альбертом Эйнштейном в годы его детства. Также бытует мнение, что она использовалась Эйнштейном для проверки кандидатов в ассистенты на способность к логическому мышлению.

`rdfs:comment` [language: ru]

На улице стоят пять домов.
 Англичанин живёт в красном доме.
 У испанца есть собака.
 В зелёном доме пьют кофе.
 Украинец пьёт чай.
 Зелёный дом стоит сразу справа от белого дома.
 Тот, кто курит Old Gold, разводит улиток.
 В жёлтом доме курят Kool.
 В центральном доме пьют молоко.
 Норвежец живёт в первом доме.
 Сосед того, кто курит Chesterfield, держит лису.
 В доме по соседству с тем, в котором держат лошадь, курят Kool.
 Тот, кто курит Lucky Strike, пьёт апельсиновый сок.
 Японец курит Parliament.
 Норвежец живёт рядом с синим домом.

Кто пьёт воду? Кто держит зебру?

Рис.4. Исходное задание для «загадки Эйнштейна»

Доказательств авторства задачи нет. Иногда автором головоломки называют Льюиса Кэрролла, но в условии упоминаются марки сигарет, которые не существовали при жизни Кэрролла и во времена детства Эйнштейна.

Рассмотрим пример построения онтологии на примере решения «загадки Эйнштейна». Для начала работы необходимо создать новую онтологию, которой автоматически будет назначен домен. Например, <http://www.semanticweb.org/eldomaco/ontologies/2025/7/einstein>.

После создания онтологии, необходимо предварительно создать иерархию классов (концептов) и по 5 индивидов для каждого из них (рис. 5):

- Дома: *Дом1, Дом2, Дом3, Дом4, Дом5*;
- Животные: *Зебра, Лиса, Лошадь, Собака, Улитки*;
- Мужчины: *Англичанин, Испанец, Норвежец, Украинец, Японец*;
- Напитки: *Апельсиновый сок, Вода, Кофе, Молоко, Чай*;
- Сигареты: *Chesterfield, Kool, Lucky_Strike, Old_gold, Parliament*;
- Цвет: *Белый, Желтый, Зеленый, Красный, Синий*.

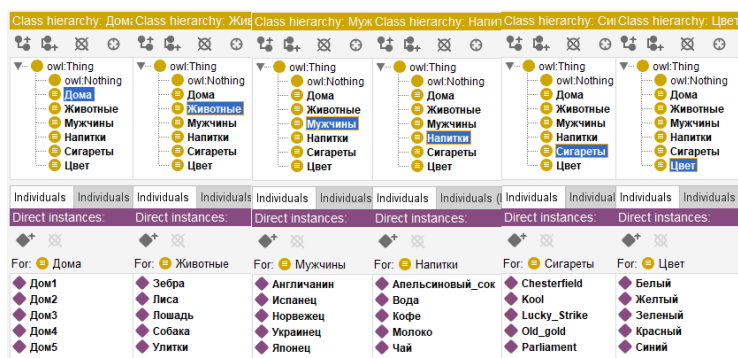


Рис. 5. Необходимые для решения «загадки Эйнштейна» дерево классов и индивиды в Protégé

Далее нужно создать отношения (предикаты) со свойством «один к одному», которое в Protégé реализуется одновременным использованием сразу 2х опций «*functional*» (один ко многим) и «*inverse functional*» (многие к одному) (рис. 6):

- жить_в (домен: *Мужчины*, значение: *Дома*);
- имеет_животное: (домен: *Мужчины*, значение: *Животные*);
- имеет_цвет: (домен: *Дома*, значение: *Цвет*);
- курить_сигареты: (домен: *Мужчины*, значение: *Сигареты*);
- находится_справа_от: (домен: *Дома*, значение: *Дома*);
- пить_напиток: (домен: *Мужчины*, значение: *Напитки*).

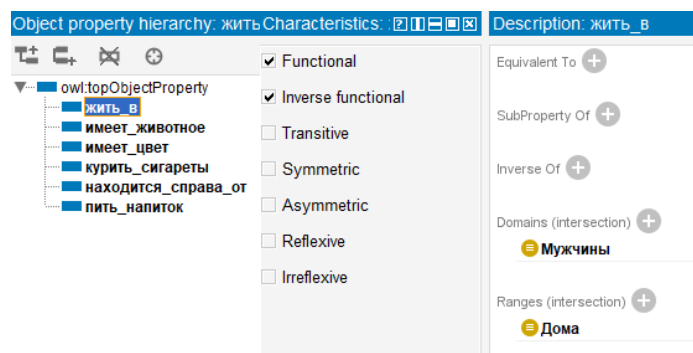


Рис. 6. Демонстрация дерева отношений в Protégé, на примере отношения «Жить_в» и его свойств

Далее необходимо задать ограничения для классов (аксиоматизация) и сообщить факты для индивидов, чтобы система могла выполнять логические операции. Рассмотрим краткое описание построения аксиом и фактов для решения «загадки Эйнштейна».

Описанные условия (рис. 4) можно задавать как аксиомы (правила для концептов) или факты (правила для индивидов). Простые условия, по типу «находится_справа_от Дом1», будем задавать как факты (рис. 7), а более сложные (составные) как аксиомы (рис.8).

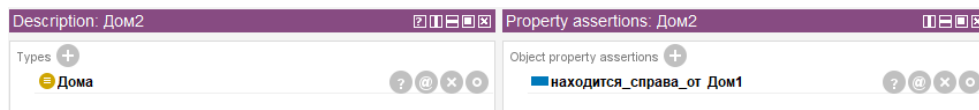


Рис. 7. Демонстрация описания факта для индивида «Дом2»

Индивид «Дом1» находится справа от «ничего». Для этого в онтологиях применяется концепт «nothing» и ключевое слово «only» (рис. 8).

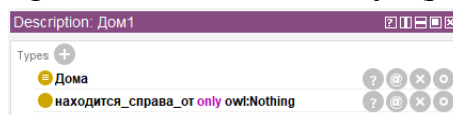


Рис. 8. Демонстрация описания аксиомы для класса «Дом1»

Индивид «Дом5» находится справа от «Дом4», но вот «Дом6» не существует, а указывать какие-либо правила для «nothing» мы не можем. Для этого опишем индивиду «Дом5» аксиому «находится слева» или НЕ-«находится справа»: «inverse (находится_справа_от) only owl:Nothing». С помощью «inverse» можно получать пассивный залог для отношений, которые не могут быть описаны прямым способом.

Аналогично для «Кофе» «inverse (пить_напиток) some (жить_в some (имеет_цвет value Зеленый))», что означает правило «в зеленом доме пьют кофе». Дословно аксиома обозначается так: «кофе пьется в некотором доме, в котором кто-то живет, и который имеет цвет Зеленый». «value» означает конкретное значение, в отличие от «some» - некоторый из возможных.

Далее рассмотрим наиболее комплексную аксиому, для индивида «сигареты» - «chesterfield» (рис. 9).

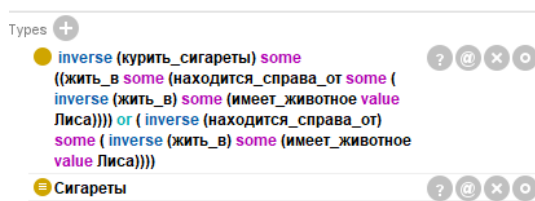


Рис. 9. Демонстрация аксиомы для индивида «Сигареты» - «Chesterfield»

Аксиома для сигарет «Chesterfield» читается так: «Сигареты курятся в некотором доме, в котором кто-то живет и | который находится справа от дома, в котором живет тот, кто имеет животное Лиса, | ИЛИ | который находится НЕ-справа от дома, в котором живет тот, кто имеет животное Лиса |».

Из примера выше следует, что «в доме по соседству с тем, который» это одновременно два определения: «находится справа от» и НЕ-«находится справа от», т.е. «находится слева от». Следует заметить, что в высказывании «дом сразу по соседству» мы не указывали классы, как этого требовала аксиоматика ранних версий Protégé (ниже 5-й).

На этом этапе онтология считается построенной, но описанных действий по-прежнему недостаточно для того, чтобы ризонер мог выявить новые факты. При запуске ризонера система никак не отреагирует. Так как онтология имеет «слишком» открытый мир, то для завершения построения онтологии необходима некоторая уточняющая информация, а именно:

– все классы и индивиды по умолчанию могут пересекаться, что требует дополнительной отметки: «different individuals» для индивидов и «disjoint with» для классов;

– необходимо явно описать перечисление для каждого из классов, а именно с какими конкретно индивидами данного класса нужно работать ризонеру (поле класса «equivalent to», пример перечисления: {Дом1, Дом2, Дом3, Дом4, Дом5});

– необходимо задать посылки действия, т.е. «сказать», что «Мужчины» обязательно выполняют базовые действия: (жить в some Дома) and (имеет животное some Животные) and (курить сигареты some Сигареты) and (пить напиток some Напитки), т.к. ризонер не может самостоятельно этого утверждать.

Выполнив все описанные действия, наконец можем получить ответы на поставленные вопросы (рис.10).

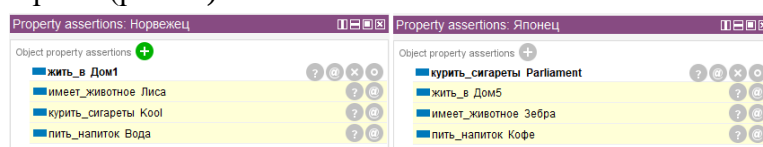


Рис. 10. Демонстрация выявленных фактов ризонером

Также можно получить ответы с помощью плагина DL query (рис. 11):

–кто пьет воду? – *пить напиток Вода* → у Норвежца;

–кто держит зебру? – *имеет животное Зебра* → у Японца.

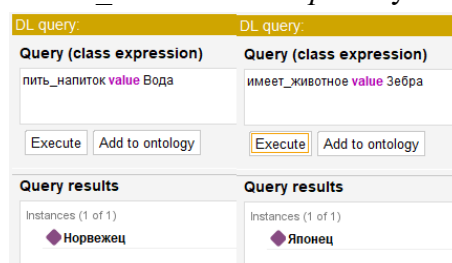


Рис. 11. Демонстрация получения ответов с помощью плагина DL-Query

Краткое изложение предлагаемых подходов и модификаций. Как было сказано ранее, онтологическая система имеет ряд недостатков, значительно усложняющих ее использование. Прежде всего это необходимость сети интернет для хранения онтологии в домене, а также необходимость подключать метаонтологию, в которой описаны основные понятия и термины.

Несмотря на все это, при построении семантических связей необходимо дополнительно указывать, что классы и индивиды не связаны между собой иначе понятия могут пересекаться. Нотация IDEF5, как альтернатива OWL, имеет учебный и исследовательский характер.

Для решения ряда описанных недостатков предлагается набор изменений редактора онтологий, которые направлены на цель создания из него интегрированной среды разработки (IDE), направленной на расширение возможностей инструмента построения онтологий. Онтологическая система вряд ли сможет заменить нейросети, но в виду наличия их множества вполне сможет их дополнить или объединить в более перспективную программную среду. Предлагаемый подход позволит использовать онтологии не только в рамках исследований экспертов или в учебных целях, а и для решения рутинных задач. Таких как построение графиков, платежа кредита для нефиксированного дохода, органайзер встреч по приоритетам или любая другая задача, которая имеет в своем составе семантические связи и логические операции.

Рассмотрим предлагаемые изменения.

Прежде всего введем свойство «disjointWith» по умолчанию, т.е. любой класс или индивид при построении онтологии получает атрибут «не пересекаться» с остальными. Тогда ризонер (машина вывода) в условиях, когда, согласно фактам, некий индивид будет подходить под определение нескольких классов будет назначать ему атрибут «inferred», т.е. предположительно эквивалентны, либо выдавать ошибку.

Согласно концепции открытого мира (OWA) система не может утверждать о чем-либо, если об этом не было сказано. Следовательно, в работе инструмента «иерархия классов» необходимо исключить необходимость дополнительного описания перечислений индивидов для каждого из классов. Таким образом, система должна работать с тем набором индивидов, созданными как экземпляры этих классов, которые описаны в системе и выдавать ошибку, если их аксиоматика противоречит описанным фактам.

Для инструмента построения отношений (бинарных отношений или предикатов) необходимо устранить недостаток отсутствия значений по умолчанию. Например, согласно рисунку 6, если ничего не отметить, то какие свойства по итогу будет иметь свойство? Если не отметить «транзитивно», то почему нет свойства «не транзитивно», ведь «асимметрично» и «иррефлексивно» присутствуют? Почему отсутствует свойство «один к одному» «full functional», которое необходимо получать одновременным указанием «functional» (один ко многим) и «inverse functional» (многие к одному)? Тогда должно присутствовать свойство по умолчанию «not functional» «много ко многим».

Таким образом, для описания множества отношения классов необходимо решить ряд имеющихся недостатков:

- дополнить свойства отношений и ввести значения по умолчанию:
 - functional (по умолчанию, $1 \rightarrow \infty$), inverse functional ($\infty \rightarrow 1$), full functional ($\infty \rightarrow \infty$), not functional ($1 \rightarrow 1$);
 - transitive, not transitive (по умолчанию);
 - symmetric, asymmetric (по умолчанию);
 - reflexive, irreflexive (по умолчанию).
- добавить множество условий описания domain и range, для отдельного описания каждого из сочетаний в рамках одного отношения (*девушка имеет (1) яблоко*, но тут же *девушка имеет (x) апельсинов*), с целью исключения необходимости описывать аксиоматику классам для посылки действия (т.к. все описания касаются наличия яблока у девочки, но ничего не сказано, что девушка может и не иметь яблока вовсе);

- посылку действия возложить на запрос, т.е. при разборе запроса исходить из запрашиваемого факта, истинность или ложность которого доказывать согласно множеству аксиом и фактов в связанных с запрашиваемыми сущностями отношениях;
- расширить машину вывода логикой троичных предикатов [14, 15], с целью внедрения дополнительного ответа системы вида «неизвестно» (unknown) или «неопределено» (undefined).

Вкладку «атрибуты классов», в которой описываются литералы или константы, следует исключить вовсе, а данные вводить непосредственно для самих классов на вкладке их редактирования.

Внедрение описанных инструментов в редактор онтологий позволит значительно снизить порог вхождения при изучении инструмента онтологической системы, а также представить узкоспециализированный редактор онтологий, подобный описанным Protégé и Ontorion Fluent Editor, в виде интегрированной среды разработки (IDE).

Выводы. В работе рассмотрена формальная модель онтологической системы, а также пример построения онтологии на общеизвестном примере «загадка Эйнштейна». Была достигнута цель модификации редактора онтологий, на примере Protégé, из узкоспециализированного редактора онтологий в IDE.

Рассмотрены следующие модификации существующих инструментов, машины вывода (ризонера) и системы выполнения запросов (SPARQL):

- внедрение логики троичных предикатов (для ранее отсутствующего ответа UNKNOWN на вопрос, не имеющий единично верного толкования);
- внедрение ограничения связности концептов и индивидов (каждый класс-концепт и каждый индивид изначально должны являться disjoint между собой);
- индивид не может существовать без класса (создание любых индивидов только как экземпляра какого-то класса);
- отменить потребность задавать перечисления для машины вывода (что описано, с тем и работаем, либо задавать отдельные перечисления для группировки индивидов в подмножества);
- ограничения вывода перенести на аксиоматику предикатов (domain / range), исключая потребность в описании дополнительных аксиом (equivalent) для классов-концептов;
- перенести атрибуты классов из выделенной таксономии (data properties) в описание классов-концептов, а также дополнить машину вывода базовыми арифметическими операциями над атрибутами.

К перспективам развития работы можно отнести:

- разработка скриптового управления предлагаемым IDE, расширение класса «Thing» до глобального метакласса, с целью размещения фактов и аксиом;
- развитие предлагаемого IDE до системы SDK, методом расширения семантических описаний средствами физической семантики.

Предлагаемая программная система имеет отличный от рассмотренного в Protégé подход к построению онтологий предметных областей и машине вывода, чем никоим образом не конфликтует с интересами разработчиков этого программного продукта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соммервилл, И. Инженерия программного обеспечения / И. Соммервилл. – 6-е изд., пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 624 с. – ISBN 5-8459-0330-0.
2. Андриевская, Н. К. Онтологический подход в системах обработки данных научных и научно-образовательных организаций / Н. К. Андриевская // Проблемы искусственного интеллекта. – 2020. – №1(16). – С. 23–36.
3. Мазная, Е. А. Онтологическое обоснование семантического треугольника Г. Фреге: философский и лингвистический аспекты / Е. А. Мазная // Философия: проблемы, подходы, решения. – 2012. – №1(11), Т. 2. – С. 3–9.
4. Пospelов, Д. А. Прикладная семиотика / Д. А. Пospelов, Г. С. Осипов // Новости искусственного интеллекта. – 1999. – № 1. – С. 9–35.
5. Цуканова, Н. И. Онтологическая модель представления и организации знаний / Н. И. Цуканова. – Москва: Горячая Линия–Телеком, 2015. – 272 с. – ISBN 978-5-9912-0454-5.
6. Web Ontology Language (OWL) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/OWL> (дата обращения: 10.09.2025).
7. Mendes P. N. DBpedia: a multilingual cross-domain knowledge base / P. N. Mendes, M. Jakob, C. Bizer // LREC. – 2012. – P. 1813–1817.
8. Алексеева, М. Б. Теория систем и системный анализ: учебник и практикум для академического бакалавриата / М. Б. Алексеева, П. П. Ветренко. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 304 с. – Серия: Бакалавр. Академический курс.
9. Лапшин, В. А. Онтологии в компьютерных системах / В. А. Лапшин. – Москва: Научный мир, 2010. – 222 с. – ISBN 978-5-91522-193-1.
10. Цвелик, Е. А. Метод построения иерархии критериев на основе онтологического анализа системы / Е. А. Цвелик // Сетевой научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2013. – №4.
11. Каунг, М. Х. Анализ Веб онтологии (owl) и семантическая веб-технология / М. Х. Каунг // Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2017. – № 4 (16).
12. Муромцев, Д. Индустриальные графы знаний - интеллектуальное ядро цифровой экономики / Д. Муромцев, Д. Волчек, А. Романов // Control Engineering Россия. – 2019. – № 5(83). – С. 32-39.
13. Боргест, Н. М. Онтологический редактор Fluent Editor: учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Н. М. Боргест, А. А. Орлова. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 44 с.
14. Верба, В. С. Троичная логика для выявления групп воздушных объектов на основе неопределенных признаков / В. С. Верба // VI международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020). – Секция: Науки о данных. – С. 897–904.
15. Виттих, В. А. Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами / В. А. Виттих, П. В. Смирнов, С.В. Смирнов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – №5. – С. 45-53.

Поступила в редакцию 26.09.2025 г., рекомендована к печати 14.10.2025 г.

DESIGNING AN ONTOLOGY EDITOR FOR SOLVING PROGRAMMING PROBLEMS

Filipishin D.A., Grigorev A.V.

A new approach to the construction of ontologies is proposed, the extension of the output machine by the logic of ternary predicates and the modification of the tools of the ontology editor into an integrated development environment (IDE). The article examines the capabilities of the Protégé ontology editor and the Ontorion Fluent Editor using the example of building an ontology of the well-known "Einstein's riddle" as the basis for building descriptive ontologies (OWL). The theoretical foundations of the proposed modifications are described, as well as the competitive advantages of the practical application of the proposed methods.

Keywords: ontology, axiom, fact, triplet, concept, object, subject, relation, class instance, dl query, SPARQL, OWL.

Филипишин Дмитрий Александрович

аспирант, ассистент кафедры программной инженерии им. Л.П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», научный сотрудник молодежной научной лаборатории «Искусственный интеллект», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: domaco@mail.ru

Filipishin Dmitrii Aleksandrovich

Postgraduate student, Assistant at Department of Software Engineering named after L.P. Feldman of Donetsk National Technical University, Researcher at the youth scientific laboratory of Artificial intelligence, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Григорьев Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии им. Л.П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: grigorievalvl@mail.ru

Grigorev Aleksandr Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Software Engineering named after L.P. Feldman, Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СБОРНОЙ ВИДОВОЙ СПОРТИВНОЙ КОМАНДЫ

© 2025 Мельник А.-В.В., Ткаченко Д.Н.

В данной работе построена математическая модель отбора кандидатов в сборную по отдельному виду спорта на основе статистического анализа результатов выступления спортсменов на разноуровневых соревнованиях. На основе модели разработан программный прототип, позволяющий проверить адекватность модели на основе анализа соответствия рейтинга и оценки кондиций спортсменов на примере вида спорта «Шахматы».

Ключевые слова: формирование сборной, математическая оценка кондиций спортсменов, оценка эффективности участия.

Введение. Поддержание и развитие детского спорта является одним из основных направлений, позволяющих вырастить основу для создания здорового общества и процветания государства. Для реализации этого направления создаются спортивные площадки, спортивные школы и секции, а также выделяются средства для участия сильнейших спортсменов в соревнованиях, что обеспечивает спортивный рост и подготовку талантливых детей [1].

Как правило, для формирования детских сборных используют опыт отбора с помощью вертикали олимпиад районного, городского, регионального уровней. Но, следует отметить, что такой перенос из научных дисциплин в спортивные не всегда дает объективный результат в виду того, что:

- 1) Нет возможности постепенного наращивания сложности заданий, как это происходит на тематических олимпиадах, так как каждый этап отбора в спорте представляет собой соревнование, сложность которого заранее проблематично установить или задать;
- 2) Довольно часто воспитание талантливого спортсмена в настоящее время начинается с младшего школьного возраста, а в таком возрасте возможен срыв отдельного соревнования по причине болезни, локального спада, психологическо-возрастной причине.

В виду указанных причин возможны случаи, когда перспективный спортсмен по формальным признакам не попадает в сборную. Во многих видах спорта для этого случая предусмотрена возможность принятия в сборную по решению тренерского совета соответствующей федерации [2], но в этом случае возникает вопрос обоснования причин, по которым конкретный ребенок попадает в сборную. Создание математических, а затем и технических средств обоснования такого отбора позволит объективно оценивать силу спортсменов за выбранный временной интервал, что в конечном итоге будет способствовать воспитанию более сильных спортсменов в здоровой конкуренции по понятным правилам, и, в конечном итоге, приведет к повышению эффективности использования бюджетных средств.

Введение в предметную область. Одним из ключевых элементов, составляющих основу спорта, являются соревнования. Эти соревнования бывают разных уровней (например, клубные, городские, районные, региональные, всероссийские и т.п.). Как правило, соревнования регионального и всероссийского уровня собирают значительное количество участников, что позволяет разделить детей по возрасту, уровню подготовки, весу и т.п. Но соревнования более низкого уровня уже не обладают большой численностью, и, соответственно, для создания соревновательного момента приходится объединять разные категории. С одной стороны, это также имеет и положительный эффект, особенно в видах спорта, где такое смешивание не дает критическое преимущество какому-либо подмножеству спортсменов, так как при этом более слабая группа имеет возможность обучаться и готовиться к более сильным соперникам. С другой стороны, в этом случае оценить силу выступления отдельного спортсмена становится сложнее, особенно для более «слабой», в объединенной группе, категории.

Введем формальные обозначения для элементов, которые будут использоваться при формировании спортивной сборной. Среди характеристик турнира следует выделить его уровень значимости (клубный, городской, региональный, федеральный и т.п.); количество участников; является ли он смешанным или отдельным по гендерному признаку (в некоторых случаях женщины и мужчины участвуют в совместном, так называемом открытом турнире), дополнительные характеристики, свойственные только для какого-либо конкретного вида спорта (вес, возраст, разряд и т.п.). При этом каждая изолированно соревнующаяся группа рассматривается в рамках турнира отдельно. Например, если в турнире есть категория девушек до 15 лет, и отдельно – старше 15, то в рамках формализации задачи будут использоваться 2 элемента множества с соответствующими значениями ограничений. Следует отметить, что характеристика принадлежности по полу применима для видов спорта, в которых мужчины имеют фактическое или признанное преимущество (борьба, шахматы и т.п.), а участников для создания большей конкуренции или по личному желанию включают в обобщенное соревнование.

Таким образом, информация об турнире представима в виде:

$$t_i = (t_1^i, t_2^i, t_3^i, t_4^i, t_5^i, t_6^i \dots),$$

где t_1^i – идентификатор турнира; t_2^i – дата начала проведения турнира;

$$t_3^i = \begin{cases} 4, \text{если турнир федерального уровня} \\ 3, \text{если турнир регионального уровня} \\ 2, \text{если турнир городского уровня} \\ 1, \text{если турнир клубный} \\ 0, \text{иначе} \end{cases},$$

$$t_4^i = \begin{cases} 2, \text{для женских соревнований} \\ 1, \text{для мужских соревнований} \\ 0, \text{иначе} \end{cases},$$

t_5^i и t_6^i – соответственно наименьший и наибольший год рождения, допустимый для участия в группе соревнующихся; дополнительные параметры могут варьироваться в зависимости от вида спорта.

Спортсмена характеризует его идентификатор (может использоваться фамилия имя отчество, либо номер, выданный спортсмену при регистрации в федерации соответствующего спортивного направления), год рождения (как правило, в детском спорте организуют соревнования с разбиением по возрастам), пол, а также дополнительные характеристики, которые могут варьироваться в зависимости от вида спорта и влиять на участие в той или иной категории соревнований (вес, рейтинг и т.п.):

$$x_i = (x_1^i, x_2^i, x_3^i, \dots),$$

где x_1^i – идентификатор спортсмена; x_2^i – год рождения;

$$x_3^i = \begin{cases} 1, & \text{если спортсмен мужского рода} \\ 2, & \text{если спортсмен женского рода} \end{cases}.$$

При формировании сборной, как правило, используются подмножество характеристик турнира, поэтому можно обозначить набор ограничений в виде вектора:

$$B = (b_1, b_2, b_3, \dots),$$

где:

$$b_1 = \begin{cases} 2, & \text{для женских соревнований} \\ 1, & \text{для мужских соревнований} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

b_2 и b_3 – соответственно наименьший и наибольший год рождения, допустимый для участия в соревновании. Также могут присутствовать другие видовые характеристики спорта, указанные в дополнительных параметрах.

Таким образом, задача формирования сборной примет вид:

$$x^* = \arg \max_{x \in X : b_2 \leq x_2 \leq b_3 \wedge ((x_3 = b_1) \vee (b_1 = 0))} f(x, T),$$

где $f(x, T)$ – функция оценки кондиции спортсмена на основе участия в множестве турниров T , X – множество спортсменов, на основе которых формируется сборная, B – конкретные требования для отбора спортсменов на соревнование и/или сборную.

Математическое моделирование оценки кондиций спортсмена по результатам соревнований. Для определения кондиций спортсмена можно попробовать использовать какие-либо физические показатели (скорость бега, сила удара, скорость решения задач, скорость реакции и т.п.), но в стрессовых условиях соревнований данные показатели могут измениться и вообще никогда не приблизиться к тем, которые показывает спортсмен на тренировках. В виду этого будем оценивать спортсменов исключительно по результатам, показанным ими в соревнованиях.

Каждому игроку в конкретном турнире можно поставить в соответствие число, соответствующее занятому им месту. Обозначим построенную таким образом матрицу $U^{n \times m}$ ($n = |X|$ – количество рассматриваемых спортсменов-потенциальных участников сборной, $m = |T|$ – количество турниров, на которых осуществляется оценка спортсменов), где :

$$u_{ij} = \begin{cases} 0, \text{если } i - \text{й игрок не участвовал в } j - \text{м соревновании,} \\ 1, \text{если } i - \text{й игрок в } j - \text{м соревновании занял } 1 - \text{е место,} \\ 2, \text{если } i - \text{й игрок в } j - \text{м соревновании занял } 2 - \text{е место,} \\ \dots \end{cases}$$

Следует отметить, что не во всех случаях можно установить место участника в турнире однозначно, т.е. на несколько мест в равной степени претендует несколько участников, и порядок в соответствии с регламентом установить невозможно (так называемая «дележка мест»). В этом случае для сохранения суммарного набора мест u_{ij} вычисляется как среднее арифметическое средних мест в рамках одной группы претендентов, и тогда u_{ij} может стать дробным, а не целым числом.

На основании матрицы U можно строить функцию, описывающую кондиции спортсмена. Поскольку данный показатель условный, опишем свойства, которым должна удовлетворять эта функция:

– чем меньшие места по номеру занимает спортсмен, тем выше значение показателя $f(x, T)$;

– влияние клубных соревнований значительно ниже влияния других соревнований, поскольку носит тренировочный характер и проходит в более комфортных условиях, что приводит к более хорошим показателям.

Также для стимуляции юных спортсменов логично, чтобы функция $f(x, T)$ была положительна для любого занятого в соревновании места, т.к. в этом случае у спортсмена будет позитивный моральный эффект от участия.

В качестве такой оценочной формулы может использоваться следующая:

$$f(x_i, T) = \sum_{j=1}^m F(x_i, t_j), \quad (1)$$

где $F(x_i, t_j)$ соответствует оценке эффективности участия i -го спортсмена в j -м соревновании и вычисляется по формуле:

$$F(x_i, t_j) = \left(\frac{1}{u_{ij}} + \frac{n_j - u_{ij}}{100} \right) k_j, \quad (2)$$

где n_j – количество участников в j -м турнире; k_j – весовой коэффициент j -го турнира, определяемым уровнем и спецификацией турнира, $k_j \in R$, $k_j \geq 0$,

$$k_j = g_1(t_3^j) \cdot g_2(t_4^j)$$

где $g_1(x)$ – ступенчатая неубывающая функция, значения которой определяются коэффициентами значимости турнира; $g_2(x)$ – ступенчатая неубывающая функция, значения которой определяются спецификацией турнира (например, мужские, женские или открытые соревнования). Значения функций $g_1(x)$ и $g_2(x)$ определяется с помощью экспертов по конкретному виду спорта.

Первое слагаемое в (2) обозначает, что за каждое место спортсменов получает баллы, обратно пропорциональные занятому месту. В виду того, что зависимость гиперболическая, падение значения этого слагаемого для лидеров будет большим, а для последних мест практически не значимым, что соответствует цели поддерживать участников любого уровня в стремлении зарабатывать опыт и баллы за участие.

Второе слагаемое в (2) введено для стимулирования участия в больших турнирах, т.к. это слагаемое увеличивает итоговый балл за счет того, сколько соперников оказались слабее оцениваемого спортсмена. Введение такого коэффициента обусловлено тем, что участие в крупных турнирах – важный элемент развития спортсмена и спорта в целом, так как на них можно получить большой скачок в развитии за счет взаимодействия с другими спортсменами, с их техникой, новыми подходами, спортсмен получает дополнительную мотивацию для роста за счет встречи с сильнейшими спортсменами. Кроме этого, крупные турниры позволяют налаживать связи между различными регионами, усиливая спортивное движение в целом.

Покажем, что данная функция удовлетворяет ранее описанным свойствам.

Для проверки первого свойства рассмотрим $f(x, T)$ для $T = \{t_1\}$ – только для одного турнира. Покажем, что для любых игроков i и s $f(x_i, T) > f(x_s, T)$, если $u_{i1} < u_{s1}$. Действительно:

$$\begin{aligned} f(x_i, T) - f(x_s, T) &= \left(\frac{1}{u_{i1}} + \frac{n_1 - u_{i1}}{100} \right) k_1 - \left(\frac{1}{u_{s1}} + \frac{n_1 - u_{s1}}{100} \right) k_1 = \\ &= \left(\frac{1}{u_{i1}} - \frac{1}{u_{s1}} + \frac{n_1 - u_{i1}}{100} - \frac{n_1 - u_{s1}}{100} \right) k_1 = \left(\frac{u_{s1} - u_{i1}}{u_{i1} u_{s1}} + \frac{u_{s1} - u_{i1}}{100} \right) k_1 > 0 \end{aligned}$$

т.к. все коэффициенты положительны и $u_{s1} - u_{i1} > 0$.

Второе свойство обеспечивается выбором значений k_j , что определяется совокупностью характеристик турнира.

Следует отметить, что (1) является аддитивной моделью, из-за чего наблюдается накопительный эффект, и спортсмен, участвующий в большом количестве турниров, наберет большее значение $f(x, T)$. В виду этого, при применении данной оценки необходимо ограничивать количество учитываемых соревнований несколькими лучшими в случае, если потенциальное количество турниров, в которых может участвовать спортсмен, велико. Как следствие, получим следующее выражение для оценки формы спортсмена, который в дальнейшем будем называть турнирным рейтингом:

$$\hat{f}(x_i, T) = \sum_{t \in \text{Ess}(x_i, T)} F(x_i, t), \quad (3)$$

где $\text{Ess}(x_i, T) = \{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_s}\}$ – подмножество турниров мощностью S , в которых игрок набрал наибольшее значение $F(x_i, t)$, т.е.:

$$\min_{t \in \text{Ess}(x_i, t)} F(x_i, t) \geq \max_{t \notin \text{Ess}(x_i, t)} F(x_i, t)$$

Ограничение участия спортсмена в турнирах имеет смысл, т.к. при слишком большом количестве турниров возрастает нагрузка и появляются риски необоснованных травм, замедляется развитие спортсмена, ведь помимо соревнований требуются и тренировки с анализом и работой над недочетами спортивной формы.

Таким образом, для формирования сборной необходимо осуществить оценку успешности выступления в соревнованиях всех потенциальных сборников по формуле (3), а затем выбрать нужное количество спортсменов с наивысшей оценкой.

Применение разработанной модели к виду спорта «Шахматы». Для апробации приведенной модели будем использовать вид спорта «Шахматы» в различных дисциплинах (классические, быстрые и молниеносные). Выбор этого вида спорта связан с тем, что в шахматах внедрена сквозная рейтинговая система, которая позволит соотносить результаты работы модели с действующим рейтингом [3]. Конечно, результаты данной модели могут не полностью соответствовать ранжированию спортсменов, что связано с тем, что текущий рейтинг в шахматах отображает локальную форму спортсмена (как в смысле времени, так и в смысле «цены» рейтинга, поскольку один и тот же рейтинг в разных регионах может соответствовать разному уровню игры).

Для оценки спортивной формы спортсменов используются данные о проведенных турнирах, которые зарегистрированы на сайте фиксации рейтинга ФШР [4], поскольку это те турниры, которые проведены с полным соответствием правилам проведения шахматных турниров.

Для оценки весов турниров использовались следующие числа:

- вес уровня турнира (клубный – 0,25; городской – 1; региональный – 1,5; всероссийский – 2);
- вес типа соревнований (мужской – 1; женский – 0,75; смешанный – 1).

В качестве контрольной группы рассматривались кандидаты в детскую сборную Донецкой Народной Республики 2012-2013 года рождения, с оценкой турниров всех уровней за календарный год в период с 1.09.2024 по 31.08.2025, что определяется сроками проведения ежегодного первенства республики. За указанный период была зафиксирована турнирная активность 98 спортсменов выбранного возраста. В соответствии с рекомендациями по подготовке спортсменов, следует участвовать не менее, чем в 1 турнире раз в 2 месяца, что даст в пересчете на год 6 турниров (т.е. $S=6$) без учета типа временного контроля данных соревнований. В принципе, сборную можно формировать с учетом качества игры по каждому временному контролю отдельно, но так как соревнования зачастую проходят одновременно для различных временных контролей, рассматривалось формирование общей в этом смысле сборной. Поэтому для оценки кондиции спортсменов использовались результаты соревнований для всех временных контролей. В таблице 1 приведена информация о 15 лучших по рейтингу ФШР спортсменах соответствующих годов рождений, с указанием рейтинга по рапиду, классике и блицу, а также номер в рейтинг-листе по шахматам соответствующей возрастной категории для ДНР.

Рассмотрим детальнее расчет турнирного рейтинга для первых 10 человек. На рисунке 1 отображены лучшие 6 турниров с точки зрения рейтинга для каждого из спортсменов. Для каждого турнира указан вид соревнования в виде двух букв, где первая буква соответствует сокращению названия уровня, а вторая – типу соревнования по полу (м – мужские, ж – женские, с – смешанные); идентификатор соревнования; занятое место и оценка эффективности участия (столбец баллы). Турниры в столбцах перегруппированы так, чтобы одни и те же соревнования находились по возможности в одном столбце (если спортсмен принимал в них участие и получил количество зачетных баллов в множестве своих лучших результатов). Как видно из этой таблицы, первое место на региональных турнирах дает около 2 зачетных баллов, но к 10му месту этот показатель приближается к 0,5; в то время, как на всероссийских соревнованиях даже попадание в 30 лучших дает свыше 1 зачетного балла, что адекватно моделирует возрастающую сложность соревнований.

Таблица 1. Кандидаты в сборную команду по виду спорта «Шахматы» 2012-2013 г.р.

№ п/п	Ф.И.О.	Рейтинг ФШР			№ в рейтинг-листе	пол	Турнирный рейтинг
		классика	быстрые	молниеносные			
1	Иванов Т. А.	1619	1616	1511	1	М	7,424314
2	Ефремов А. А.	1469	1658	1545	3	М	7,238333
3	Найденов А. П.	1548	1746	1635	2	М	7,056429
4	Мартыненко С. Е.	1410	1454	1389	4	Ж	4,160952
5	Юшков Д. Е.	1374	1478	1513	5	М	3,671071
6	Темир А. Л.	1279	1447	1507	9	М	3,605833
7	Тимофеев П. Д.	1241	1374	1265	10	М	2,898864
8	Фесенко Я. С.	1342	1297	1129	6	Ж	2,47733
9	Спиридонов И. С.	1080	1289	1132	20	М	2,33348
10	Пономаренко С. И.	–	1227	1096	168	М	2,000748
11	Григовский Ф. А.	1100	1166	1246	17	М	1,98488
12	Юркова А. С.	1186	1368	1176	12	Ж	1,92
13	Дангулжи А. Н.	1406	1418	1406	118	М	1,885833
14	Остроушко М. В.	1321	1440	1339	7	М	1,757885
15	Карпусь Ф. Р.	1042	1255	1181	22	М	1,424928

№	турнир 1				турнир 2				турнир 3				турнир 4				турнир 5				турнир 6			
	вид	id	место	баллы	вид	id	место	баллы	вид	id	место	баллы	вид	id	место	баллы	вид	id	место	баллы	вид	id	место	баллы
1	р, с	89	1	1,995	в, м	255	10	1,560	г, с	145	1	1,150	р, м	247	5	1,005	в, м	246	17	0,858	р, м	273	9	0,857
3	р, с	89	4	0,825	в, м	255	24	1,163	р, с	194	1	2,025	г, с	106	2	0,630	р, с	133	1	1,920	р, м	234	5	0,675
2	р, с	89	3	0,965	в, м	255	28	1,071	р, с	194	2	1,260	р, м	238	2	1,095	р, с	133	2	1,155	г, с	282	1	1,510
4	г, ж	27	1	0,818	г, ж	105	1	0,810	р, с	194	8	0,608	в, ж	287	48	0,662	р, ж	266	7	0,709	р, ж	240	3	0,555
5	р, с	89	7	0,619	г, с	146	1	1,380	р, с	194	7	0,649	к, с	121	1	0,330	к, с	66	1	0,298	р, м	234	12	0,395
9	р, с	89	8	0,578	г, с	146	2	0,870	р, с	194	4	0,855	г, с	179	3	0,403	р, с	133	6	0,595	к, с	164	1	0,305
10	р, с	89	5	0,735	к, с	205	1	0,278	р, с	194	3	0,995	к, с	208	1	0,275	р, с	133	11	0,406	г, с	122	10	0,210
6	р, с	89	11	0,481	р, ж	232	3	0,521	р, ж	231	3	0,499	в, ж	254	34	0,359	р, с	133	14	0,332	г, с	155	8	0,285
20	р, с	89	14	0,407	г, с	290	42	0,434	р, с	194	14	0,437	р, м	238	13	0,295	р, с	133	10	0,435	р, м	234	15	0,325
168	г, с	186	2	0,670	к, с	173	1	0,303	р, с	194	11	0,511	р, м	238	12	0,320	р, с	243	15	0,027	р, м	234	23	0,170

Рис. 1. Расчет элементов суммы оценки кондиций

Сопоставим результирующую оценку кондиций спортсмена с его рейтингом, зафиксированном ФШР. Из рисунка 1 очевидно, что первые 3 игрока имеют значительно лучшие кондиции, что подтверждается и разностью рейтингов между ними и преследователями по 2м дисциплинам. Средний рейтинг этих спортсменов где-то на 200 единиц выше 4-го места, что в общем-то соответствует разрыву в разряд. Следует отметить, что в анализе учитывались дисциплины во всех видах временного контроля, поэтому расположение приблизительно соответствует усредненному рейтингу. Это показывает, что модель адекватно определяет кондиции игроков, при этом за счет аккумуляции оценок за год позволяет выбрать в среднем лучшего игрока, вне зависимости от возможных локальных провалов на отдельных соревнованиях.

Программная реализация. Для автоматизации обработки данных о результатах соревнований разработана тестовая модель программного обеспечения на базе Microsoft Excel с помощью языка Visual Basic for Application. Выбор данного вида программных средств обусловлен экспериментальностью подхода и обеспечением максимальной прозрачности как на этапе ввода начальных данных, так и просмотра промежуточных результатов. Схема IDEF0 процесса формирования сборной с учетом использования разрабатываемого программного обеспечения представлена на рис.2.

Тренерский совет сборной на основе выбранного промежутка времени формирует

На текущий момент данные о турнирах и категориях вносятся на 1 рабочий лист (рис.3), об игроках – на другой. Категории, веса, типы соревнований могут дополняться без изменения кода программы.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Программа для нахождения минимальных расстояний между вершинами графа											

Программа для накопления информации о достижениях детей				Рассчитать рейтинги		Весы уровней соревнований		Тип соревнований	
№	Категория	Год рождения		От	До	Клубный	0,25	мужской	1
1	2020-2018	2020	2018			Городской	1	женский	0,75
2	2017-2016	2017	2016			Региональный	1,5	смешанный	1
3	2015-2014	2015	2014			Всероссийский	2		
4	2013-2012	2013	2012						
5	2011-2010	2011	2010						

Список игроков формируется на основе экспорта данных из БЗД ФИР и

После формирования всех входных данных можно приступить к процессу формирования сборной, осуществляемой на основе ранжирования по турнирному рейтингу (рис.4).

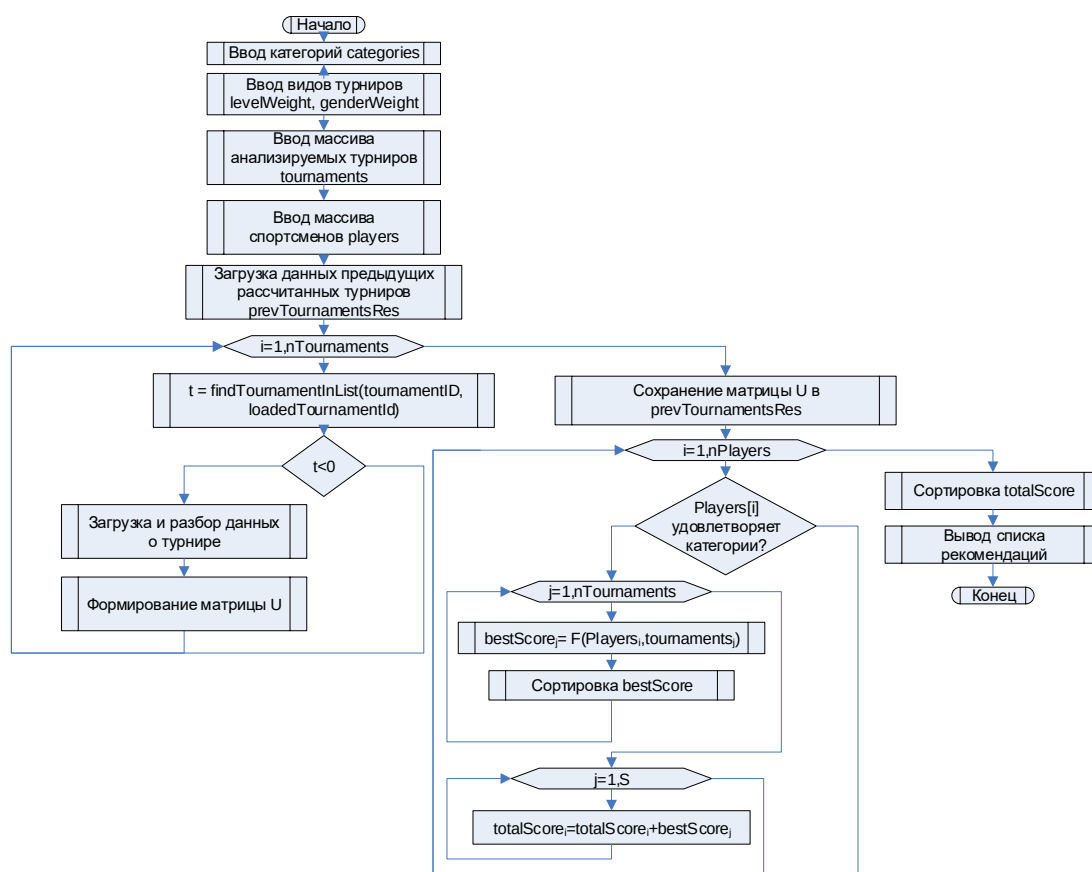


Рис. 4. Блок-схема алгоритма формирования рекомендаций относительно состава сборной

С учетом того, что анализируется большое количество турниров, а хранить информацию обо всех турнирах без применения баз данных не целесообразно, результаты обсчета турнирных баллов для спортсменов из выбранного региона сохраняются на вспомогательной странице. А в последующем, если идентификаторы турниров совпадают, то просто используются результаты прошлых вычислений (рис.4).

После вычисления итоговых турнирных рейтингов для спортсменов, удовлетворяющих возрастным требованиям категории, осуществляется ранжирование результатов и первые S спортсменов рекомендуются к включению в сборную. Результаты представляются в форме, близкой к приведенной в таблице 1.

Выводы. В соответствии с разработанной моделью, можно проводить классификацию как всех спортсменов по произвольному виду спорта в целом, так и по отдельной категории, т.к. адекватность разработанной модели подтверждена утвержденной и внедренной рейтинговой системой по отдельному виду спорта «Шахматы». Следует также отметить, что отсутствие стандартизированных рейтинг систем в большинстве видов спорта делают результаты данного исследования особенно актуальными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Концепции развития детско-юношеского спорта в Российской Федерации до 2030 года и плана мероприятий по ее реализации: распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2021 г. № 3894-р.

2. Об утверждении Общих принципов и критериев формирования списков кандидатов в спортивные сборные команды Донецкой Народной Республики и порядка их утверждения: приказ М-ва молодежи, спорта и туризма Донецкой Народной Республики от 17.11.2023 г. №01-09/143.
3. Ткачёв, А. Зачем нам нужен российский рейтинг [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ruchess.ru/news/report/zachem_nam_nuzhem_rossiyskiy_rating/?sphrase_id=97141 (дата обращения 19.09.2025).
4. Рейтинг ФШР: офиц. сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://ratings.ruchess.ru/> (дата обращения 19.09.2025).

Поступила в редакцию 29.09.2025 г., рекомендована к печати 17.10.2025 г.

AUTOMATION OF DECISION-MAKING IN THE SELECTING PEOPLE FOR SPECIFIC SPORTS TEAM

Melnik A.-V.V., Tkachenko D.N.

In this paper, a mathematical model of the selection of candidates for the team in a particular sport is constructed based on a statistical analysis of the results of athletes' performance at multi-level competitions. Based on the model, a software prototype has been developed that makes it possible to verify the adequacy of the model based on an analysis of the compliance of the rating and assessment of sportsman' conditions using experience of Chess.

Keywords: formation of the sport team, mathematical assessment of sportsman' conditions, assessment of the effectiveness of participation.

Мельник Анна-Валентина Валентиновна

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики и компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк
e-mail: a-v.melnik@mail.ru

Melnik Anna-Valentina Valentinovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Applied Mechanics and Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Ткаченко Дмитрий Николаевич

кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник отдела прикладной механики ФГБНУ «Институт прикладной математики и механики»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк
e-mail: dntkachenko@mail.ru

Tkachenko Dmitry Nikolaevich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Junior Researcher, Department of Applied Mechanics, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ
ДИАБЕТИЧЕСКОЙ РЕТИНОПАТИИ ПО ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКИМ
ИЗОБРАЖЕНИЯМ С УЧЁТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КЛАССОВ**

© 2025 Полякова В.Е., Пикалёв Я.С.

В работе представлена мультимодальная нейросетевая модель EYEPAACS-ODR для автоматизированной оценки степени диабетической ретинопатии по изображениям глазного дна. Архитектура объединяет визуальные признаки, извлекаемые MedViT-Large, и текстовые описания поражений (МА, НЕ, ЕХ, SE), формируемые автоматически методом YOLOR-CSP. Для учёта упорядоченности стадий заболевания применяется модуль ординальной регрессии CORAL-Head и многоуровневая функция потерь, включающая CORAL focal loss и pairwise ranking loss. С целью повышения устойчивости разработана двухэтапная стратегия обучения, позволяющая компенсировать выраженный дисбаланс классов и доменное смещение между наборами EyePACS, APTOS и Messidor. Эксперименты показали высокую точность предложенной модели: F1-score = 1.00, MAE = 0.01, устойчивое снижение интегральной функции потерь на тестовой выборке. Результаты подтверждают эффективность мультимодального подхода и демонстрируют его потенциал для внедрения в клинические системы скрининга диабетической ретинопатии.

Ключевые слова: диабетическая ретинопатия, нейронные сети, ординальная регрессия, мультимодальность, медицинская диагностика, фундус-снимки, неравномерность распределения классов.

Введение. Диабетическая ретинопатия (ДР) – одно из наиболее распространённых микрососудистых осложнений сахарного диабета и основная причина потери зрения у людей трудоспособного возраста [1]. Заболевание развивается постепенно, поражая сосуды сетчатки и провоцируя развитие микроаневризм (МА), геморрагий (НЕ) и отложение экссудатов (ЕХ), что при отсутствии лечения приводит к необратимым изменениям. Несмотря на развитие офтальмологического оборудования, своевременная диагностика заболевания остаётся сложной задачей, требующей анализа большого объёма изображений глазного дна, что делает процесс трудоёмким и подверженным субъективности экспертов.

Современные системы глубокого обучения позволяют автоматизировать процесс диагностики, однако их точность ограничивается следующими факторами:

- *смещением домена* – различия в оборудовании и условиях съёмки снижают переносимость моделей;
- *шумом меток* – межэкспертная вариабельность аннотаций достигает 60–65 %;
- *дисбалансом классов* – тяжёлые стадии заболевания встречаются значительно реже (2 % от общего набора данных).

Указанные выше факторы существенно снижают обобщающую способность моделей и усложняют клиническое применение.

В ряде исследований предложены методы повышения устойчивости и справедливости таких моделей. Так, в работе [2] используется вредоносное (adversarial) обучение для уменьшения доменного смещения, а в работе [3] предлагается метод адаптивного масштабирования потерь, компенсирующий дисбаланс классов и шум разметки. Большинство существующих подходов продолжают рассматривать задачу оценки стадии ДР как обычную многоклассовую классификацию, где модель обучается путём минимизации функции перекрёстной энтропии.

Современные методы глубокого обучения демонстрируют высокую эффективность в медицинской визуализации, однако при диагностике ДР их качество существенно ограничивается рядом факторов: выраженным дисбалансом классов, доменным смещением между наборами данных, высоким уровнем шума аннотаций (до 60–65 % межэкспертного расхождения), а также различиями в оборудовании и условиях съёмки. Большинство существующих работ рассматривают задачу как многоклассовую классификацию, не учитывая естественный порядок стадий ДР, что приводит к ошибкам, не соответствующим клинической значимости (например, одинаковому штрафу за переход $0 \rightarrow 1$ и $0 \rightarrow 4$). Для решения этих проблем требуется модель, способная интегрировать визуальные признаки, локальные клинические проявления (микроаневризмы, геморрагии, твёрдые и мягкие экссудаты) и текстовые семантические описания, обеспечивая интерпретируемость, устойчивость к доменному сдвигу и корректный учёт ординальной структуры классов.

Основная цель работы заключается в разработке устойчивой мультимодальной нейросетевой модели для автоматической оценки степени диабетической ретинопатии по офтальмологическим изображениям с учётом ординальной природы классов, неравномерности распределения данных и доменного смещения. В связи с данной целью, были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать архитектуры визуальных энкодеров и определить модель, обеспечивающую наибольшую информативность и разделимость признаков для задачи ординальной регрессии.
2. Разработать мультимодальную архитектуру, объединяющую визуальные признаки и текстовые описания локальных поражений глазного дна.
3. Сформировать многоуровневую функцию потерь, учитывающую упорядоченность классов и различия распределений между доменами.
4. Реализовать двухэтапную стратегию обучения, направленную на повышение устойчивости при выраженном дисбалансе классов.
5. Провести численные эксперименты на объединённом наборе EyePACS–APTOS–Messidor и оценить модель по метрикам F1-score, MAE и значению интегральной функции потерь.
6. Сравнить предложенную систему со стандартным обучением без текстовых признаков и без стратегии двухэтапного обучения.

Сравнительный анализ архитектур извлечения визуальных признаков. Цель данного этапа – определить оптимальную модель для построения визуального энкодера мультимодальной системы диагностики диабетической ретинопатии. Для экспериментов использовался объединённый набор EyePACS–APTOS–Messidor (≈ 92 тыс. изображений, шкала ICDR 0–4, 600x600 пикселей) [4]. Сравнение проводилось между пятью архитектурами, различающимися по глубине, числу параметров и принципам построения сверточных блоков: ResNet-50 [5], StripNet-Small [6], MobileCLIP2-S4 [7], MedViT-Large [8]. Сравнение проводится на основе информативных признаков (эмбедингов), извлечённых каждой моделью, с использованием следующих количественных показателей.

1. Rand Index (RI) – измеряет степень совпадения кластеризации с истинными метками классов, оценивая все возможные пары объектов:

$$RI = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN},$$

где TP (True Positives) – количество пар объектов, принадлежащих одному классу и попавших в один кластер, TN (True Negatives) – количество пар из разных классов, попавших в разные кластеры, FP и FN – ошибки (в разных кластерах, но одного класса, и наоборот). Значение RI лежит в диапазоне $[0, 1]$, чем ближе к 1, тем выше соответствие кластеров истинным меткам.

2. Mutual Information Score (MI) – показывает, насколько знание кластера уменьшает неопределённость относительно истинного класса:

$$MI(U, V) = \sum_{i=1}^{|U|} \sum_{j=1}^{|V|} P(i, j) \log \frac{P(i, j)}{P(i)P(j)},$$

где U – истинные классы, V – кластеры, $P(i)$, $P(j)$, $P(i, j)$ – вероятности принадлежности точек к классам и кластерам. $MI = 0$ означает полную независимость, большие значения указывают на сильную связь между кластерами и метками. Обычно используется нормализованная форма (NMI), нормирующая значение в $[0, 1]$.

3. Fowlkes–Mallows Index (FMI) – оценивает баланс между точностью и полнотой кластеризации:

$$FMI = \sqrt{\frac{TP}{TP + TF} \cdot \frac{TP}{TP + FN}}.$$

4. V-measure (V) – измеряет одновременно однородность, h , и полноту, c , кластеров, обеспечивая симметричную оценку качества разбиения:

$$V = 2 \cdot \frac{h \cdot c}{h + c},$$

где h – степень, с которой каждый кластер содержит только элементы одного класса, c – степень, с которой все элементы одного класса попадают в один кластер. V лежит в диапазоне $[0, 1]$, чем выше значение, тем лучше кластеризация одновременно по однородности и полноте.

5. Silhouette Score (S) – оценка качества кластеризации эмбедингов с учетом истинных классов:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s(i),$$

где N – число объектов, для объекта i ,

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))},$$

где $a(i)$ – среднее расстояние до всех других точек своего класса, $b(i)$ – минимальное среднее расстояние до всех точек другого класса. Значение $S \approx 1$ – объект хорошо встроен в свой класс, $S \approx 0$ – на границе классов, $S < 0$ – объект ближе к другому классу.

6. Calinski-Harabasz Index (CH) – оценка компактности и разделенности кластеров:

$$CH = \frac{\text{trace}(B_k)/(K-1)}{\text{trace}(W_k)/(N-1)},$$

где K – число классов, N – число объектов, B_k – межклассовая дисперсия (1), W_k – внутрикласовая дисперсия (2):

$$B_k \sum_{i=1}^K n_i (\mu_i - \mu)^T (\mu_i - \mu), \quad (1)$$

$$W_k = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} (x - \mu_i)(x - \mu_i)^T, \quad (2)$$

где n_i – число объектов в классе i , μ_i – центр класса i , μ – центр всего датасета. Чем больше СН, тем компактнее кластеры и тем сильнее они отделены друг от друга.

7. Davies-Bouldin Index (DB) – оценка степени перекрытия и разделенности кластеров:

$$DB = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \max_{j \neq i} \frac{s_i + s_j}{d(\mu_i, \mu_j)},$$

где s_i – среднее расстояние объектов к центру своего кластера i , $d(\mu_i, \mu_j)$ – расстояние между центрами кластеров i и j . Чем меньше DB, тем лучше – кластеры более плотные и хорошо разделены.

В табл. 1 представлены результаты количественной оценки качества извлечённых эмбедингов для пяти архитектур визуальных энкодеров. Приведённые метрики отражают способность моделей формировать компактные и хорошо разделяемые кластеры признаков, соответствующие стадиям диабетической ретинопатии.

Таблица 1. Результаты метрик качества извлечения визуальных признаков для различных архитектур

Модель	Метрики						
	RI	MI	FMI	V	S	CH	DB
StripNet-Small	0.015	0.012	0.276	0.012	0.331	127853	0.923
MedViT-Large	0.385	0.551	0.551	0.551	0.017	2332	6.012
MobileCLIP2-S4	0.406	0.507	0.565	0.507	0.036	5220	3.928
ResNet-50	0.443	0.55	0.594	0.55	0.006	3228	7.723

В результате проведённого сравнения архитектур для извлечения визуальных признаков, MedViT-Large показала наилучшие показатели по большинству метрик (RI, MI, FMI, V, S), формируя максимально информативные и хорошо разделяемые эмбединги. StripNet-Small формирует очень плотные кластеры (высокий СН), однако практически не отражает реальную структуру классов (низкие значения RI, MI и V). Таким образом, для задач ординальной регрессии на изображениях глазного дна наибольшую практическую ценность представляют MedViT-Large, поскольку они обеспечивают лучшее разделение классов, более информативные эмбединги и устойчивость к шуму.

Архитектура предложенной модели. Модель EYEPAACS-ODR (рис.6) состоит из следующих блоков:

- модуль извлечения визуальных признаков – MedViT-Large [8]. Используется для выделения визуальных представлений изображений глазного дна. Весовые коэффициенты обновляются только для трёх последних слоёв (partial fine-tuning), что снижает риск переобучения;
- модуль извлечения текстовых признаков – MobileCLIPv2-Text [7]. Обеспечивает формирование текстовых эмбедингов на основе диагностических описаний и аннотаций, что расширяет признаковое пространство за счёт семантических характеристик;

- модуля слияния признаков – FiLM-Fusion [9]. Реализует параметрическое слияние визуальных и текстовых признаков:

$$\hat{f} = \gamma(f_{text}) \otimes f_{img} + \beta(f_{text}),$$

где f_{text} – текстовые признаки, f_{img} – визуальные признаки, γ и β – параметры, определяющие степень и направление влияния текстовой модальности.

- CORAL-Head. Выходной модуль, реализующий ординальную регрессию и обеспечивающий предсказание вероятностей превышения стадий заболевания.

На рисунке 1 представлена архитектура предложенной модели.

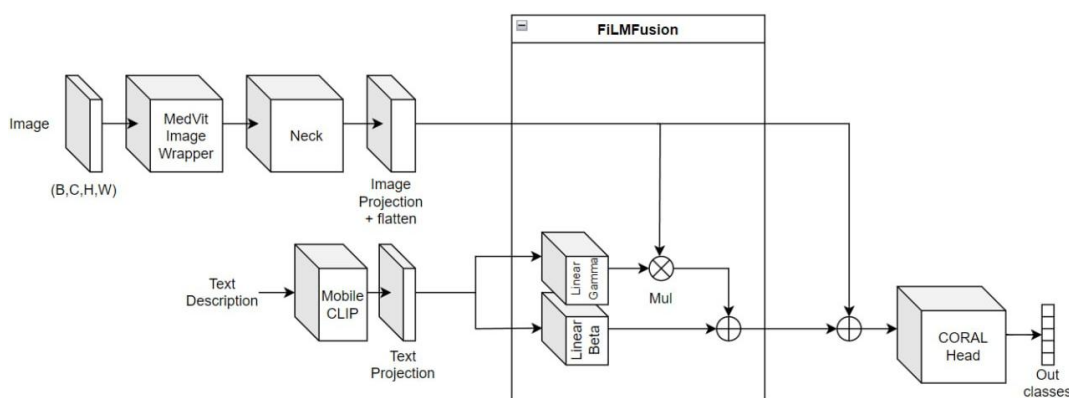


Рис. 1. Архитектура EYE PACS-ODR

1. Архитектура модели MedViT-Large. Модель MedViT (Medical Vision Transformer) представляет собой гибридную архитектуру, объединяющую сильные стороны свёрточных нейросетей (CNN) и трансформеров (Vision Transformer), специально адаптированную для задач медицинской визуализации. MedViT использует иерархическую пирамидальную структуру: пространственное разрешение постепенно уменьшается, а число каналов увеличивается на каждом уровне. Общий коэффициент понижения разрешения составляет $\times 32$, реализованный последовательностью операций $[4 \times, 2 \times, 2 \times, 2 \times]$ на четырёх стадиях. На каждом уровне сочетаются трансформерные и свёрточные блоки, что позволяет одновременно улавливать локальные и глобальные зависимости.
2. Модуль извлечения текстовых признаков MobileCLIPv2-Text – является частью компактной мультимодальной модели MobileCLIP2-S4, которая сочетает визуальный энкодер FastViT и текстовый трансформер.

Архитектура CORAL-Head (рис. 2). CORAL-Head – выходной слой, реализующий механику ординальной регрессии. Он преобразует вектор признаков $x \in R^{B \times d}$ в набор упорядоченных логитов $x \in R^{B \times (K-1)}$, каждый из которых отражает вероятности того, что степень заболевания превышает определенный порог. CORAL-Head позволяет учитывать упорядоченность классов и формировать более интерпретируемые предсказания по сравнению со стандартной softmax-классификацией. Вероятности классов вычисляются как:

$$p_{i,k} = \sigma(z_{i,k}), \hat{y}_i = \sum_{k=1}^{K-1} 1(p_{i,k} > 0.5).$$

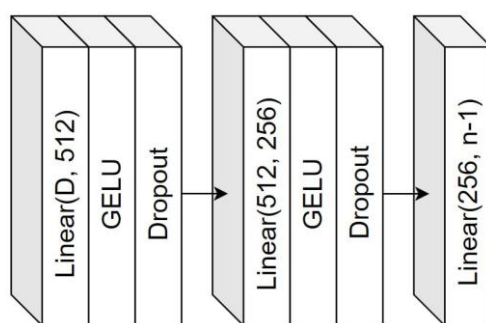


Рис. 2. Архитектура выходного модуля CORAL-Head

В связи с тем, что количество положительных примеров (класса 0, соответствующего нормальным изображениям без признаков ретинопатии) значительно преобладает над остальными классами, наблюдается выраженный дисбаланс данных. Класс 0 составляет более 70 % выборки, тогда как тяжёлые стадии (3–4) составляют менее 2 %. Такая несбалансированность приводит к смещению модели в сторону «нормальных» изображений и ухудшает способность различать патологические признаки. Для решения данной проблемы в работе реализована двухэтапная стратегия обучения:

Этап I – обучение на патологических изображениях (классы 1–4): модель учится различать стадии заболевания, стабилизируя ординальные пороги.

Этап II – интеграция класса 0 (норма): добавляются изображения без патологии, применяются взвешенные потери и методы пересэмплирования.

Такой подход позволяет модели сначала сформировать устойчивое представление патологических признаков, а затем научиться корректно отделять норму от патологии, что приводит к повышению точности и стабильности на независимых тестовых наборах данных.

Внедрение текстовых признаков. Для решения проблемы ограниченной связи между локальными проявлениями (поражениями сетчатки) и глобальной оценкой стадии заболевания предложено внедрение синтетических текстовых описаний поражений, автоматически формируемых по результатам детектирования объектов. Для этого используется отдельная модель YOLOR-CSP [10], она выполняет распознавание и подсчёт четырёх типов патологий:

1. МА. Малые локальные выпячивания стенок капилляров сетчатки, являющиеся одним из самых ранних признаков диабетической ретинопатии. На изображениях проявляются как мелкие тёмно-красные точки.
2. НЕ. Небольшие участки скопления крови в слоях сетчатки, возникающие вследствие разрыва сосудов при прогрессировании заболевания. Имеют вид пятен или штрихов различной формы и размеров.
3. EX (Hard Exudates) – твёрдые экссудаты. Светлые или желтоватые отложения липидов и белков в сетчатке, формирующиеся при нарушении проницаемости сосудов и свидетельствующие о развитии диабетического макулярного отёка.
4. SE (Soft Exudates, Cotton-Wool Spots,) – мягкие экссудаты («ватные очаги»). Белесые участки ишемии нервных волокон, возникающие при микрососудистых нарушениях и указывающие на прогрессирующее течение ретинопатии.

Полученные количественные признаки (MA_i , HE_i , EX_i , SE_i) конвертируются в структурированные текстовые описания вида:

$$t_i = \text{"Retina image with DR grade \{grade\}. Findings: MA=\{ma\}, HE=\{he\}, EX=\{ex\}, SE=\{se\}."}$$

Таким образом, каждая выборка (x_i, t_i, y_i) объединяет визуальные и семантические признаки, связывая локальные проявления заболевания с его глобальной стадией. Такой подход обеспечивает более устойчивое и интерпретируемое мультимодальное обучение, где текстовый шаблон выполняет роль автоматически формируемого клинического контекста без участия экспертов. Для интеграции визуальной и текстовой информации используется блок FiLM Fusion (Feature-wise Linear Modulation) [9], реализующий слияние по формуле:

$$\hat{f} = \gamma(f_{text}) \otimes f_{img} + \beta(f_{text}),$$

где f_{img} – визуальные признаки, f_{text} – текстовые признаки, γ и β – обучаемые коэффициенты.

Такое слияние позволяет адаптировать визуальные представления под контекст текстового описания, усиливая клинически релевантные признаки (например, участки с выявленными экссудатами или геморрагиями).

Формализация задачи ординальной регрессии. Задача ординальной регрессии используется для моделирования зависимостей, где целевая переменная принимает упорядоченные, но не равномерно распределённые значения. В контексте диагностики ДР это соответствует шкале ICDR (0-4), где каждая последующая стадия описывает прогрессирующее ухудшение состояния сетчатки. В отличие от стандартной классификации, ординальная регрессия учитывает естественный порядок классов, что позволяет снизить влияние пограничных ошибок (например, между классами 1 и 2) и повысить устойчивость модели при дисбалансе данных. Опишем итоговую задачу ординальной регрессии с учётом визуальных и текстовых признаков. Пусть дано множество:

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N,$$

где $x_i \in \mathbb{R}^{3 \times H \times W}$ – изображение глазного дна, t_i – синтетическое текстовое описание, $y_i \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ – степень ДР по шкале ICDR.

Метка кодируется бинарным вектором:

$$r_i = [r_{i1}, \dots, r_{i,K-1}], \quad r_{ik} = I[y_i > k],$$

где $I[\dots]$ – индикаторная функция, которая равна 1, если условие истинно, и 0, если условие ложно.

Далее модель предсказывает логиты:

$$z_i = [z_{i1}, \dots, z_{i,K-1}],$$

где вероятность превышения стадии k вычисляется как:

$$p_{ik} = \sigma(z_{ik}) = P(y_i > k),$$

а апостериорная вероятность принадлежности изображению класса c определяется выражением:

$$P(y_i = c) = p_{i,c-1} - p_{i,c}, \quad p_{i-1} = 1, \quad p_{i,K-1} = 0.$$

Экспериментальная часть. Для оценки предложенной модели и стратегии её обучения используется объединённый набор EyePACS–APTOS–Messidor. В качестве предварительной обработки проводится фильтрация, а также выравнивание по центру диска зрительного нерва, CLAHE-контрастирование, нормализация цвета и фотометрические аугментации.

В качестве оптимизатора применялся Ranger [10], размер батчей – 32, количество эпох – 10. В качестве количественных показателей использовались:

1. Многоуровневая функция потерь – интегральный показатель, объединяющий несколько компонент, направленных на обеспечение устойчивого обучения модели ординальной регрессии. Она включает компоненты CORAL focal loss и pairwise ranking loss, что позволяет одновременно сохранять порядок классов и согласовывать распределения признаков между различными доменами. Значение Loss отражает степень сходимости и устойчивости модели: чем меньше итоговое значение, тем более согласованы визуальные и текстовые представления и тем стабильнее формируются границы между стадиями заболевания.

$$L = \alpha_1 L_{CF} + \alpha_2 L_{pair},$$

где α_i – коэффициент взвешивания для соответствующей функции потерь.

CORAL focal loss (L_{CF}) используется для выравнивания распределений признаков между исходной (source) и целевой (target) областями. Она уменьшает различие между ковариационными матрицами признаков из разных доменов, обеспечивая согласованность представлений. L_{CF} модифицирует CORAL-приближение фокусирующим фактором $(1-p_{ik})^\gamma$, усиливая вклад сложных и редких примеров.

$$L_{CF} = -\sum_k [r_{ik}(1-p_{ik})^\gamma \log p_{ik} + (1-r_{ik})p_{ik}^\gamma \log(1-p_{ik})].$$

Pairwise ranking loss (L_{pair}) направлена на сохранение относительного порядка между объектами: объекты, близкие по значению метки, должны иметь схожие представления, а далекие – различаться в пространстве признаков.

$$L_{pair} = \frac{1}{|P|} \sum_{(i,j) \in P} \max(0, 1 - (s_i - s_j) \cdot \text{sign}(y_i - y_j)),$$

где P – множество пар с разными классами, s_i – оценка «score» для объекта i :

$$s_i = \sum_{j=0}^{K-2} \sigma(z_{i,j}),$$

где $\sigma(\cdot)$ – сигмоида, K – число классов.

Совместное использование L_{CF} и L_{pair} обеспечивает:

- сохранение порядка классов и корректное ранжирование стадий заболевания;
- согласование распределений признаков между доменами, что снижает влияние смещения данных и повышает обобщающую способность модели.

Таким образом, предложенная функция потерь позволяет формализовать задачу диагностики ДР как ординальную регрессию с доменной устойчивостью, обеспечивая стабильное и интерпретируемое обучение даже в условиях ограниченных и неоднородных данных.

2. F1-score – гармоническое среднее между Precision (точностью) и Recall (полнотой). Взвешенная версия, $F1_{weighted}$, учитывает дисбаланс классов, вычисляя среднее значение F1 для каждого класса с весом, пропорциональным числу образцов этого класса.

$$F1_c = 2 \cdot \frac{Precision_c \cdot Recall_c}{Precision_c + Recall_c},$$

$$Precision_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c},$$

$$Recall_c = \frac{TP_c}{TP_c + FN_c},$$

где TP_c – количество true positives (верно предсказанных объектов класса c), FP_c – количество false positives (ошибочно отнесенных к классу c), FN_c – количество false positives (пропущенных объектов класса c).

$$F1_{weighted} = \frac{\sum_c N_c \cdot F1_c}{\sum_c N_c},$$

где N_c – количество образцов в классе c .

Значение лежит в диапазоне $[0, 1]$. $F1_{weighted}$ позволяет объективно оценивать качество модели при дисбалансе классов, что особенно важно при диагностике заболеваний, где тяжёлые стадии встречаются значительно реже лёгких.

3. Mean absolute error (MAE) – измеряет среднее абсолютное отклонение предсказанных значений от истинных, а для ординальной регрессии учитывает «расстояние» между предсказанным и истинным классом (ошибка между соседними стадиями менее критична, чем между крайними).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|,$$

где y_i – истинная метка образца i , $\hat{y}_i$ – предсказанная моделью метка образца i , N – общее количество образцов.

В ходе экспериментов оценивались следующие модели:

1. Модель с использованием стандартной стратегии обучения и без использования текстовых признаков (standart).

2. Модель с использованием стратегии обучения этапа I (stage 1).

3. Модель с использованием стратегии обучения этапов I и II (stage 1+2).

Таблица 2. Результаты численных экспериментов на объединенном наборе

	Loss_train	Loss_test	F1_train	F1_test	MAE_train	MAE_test
standart	0.23	0.22	0.84	0.59	0.19	0.69
stage 1	0.02	0.01	0.99	1.0	0.01	0.02
stage 1+2	0.01	0.01	1.0	1.0	0.0	0.0

Как видно из табл. 2, на втором этапе обучения достигнуто заметное улучшение всех показателей – значение MAE снизилось до 0.01, F1-score вырос до 0.99–1.00. Это подтверждает тот факт, что постепенное включение класса 0 способствует формированию устойчивых границ между нормальными и патологическими случаями, повышая точность ординальной регрессии.

Заключение. В работе представлена мультимодальная нейросетевая модель EYEPAACS-ODR для оценки степени диабетической ретинопатии, объединяющая визуальные признаки MedViT-Large, текстовые эмбединги, сформированные на основе детектируемых поражений, и выходной модуль ординальной регрессии CORAL-Head. Проведенный сравнительный анализ архитектур визуальных энкодеров, показал, что MedViT-Large формирует наиболее информативные и хорошо разделимые эмбединги, превосходя альтернативы по метрикам RI, MI, FMI, V и Silhouette Score.

В работе реализована двухэтапная стратегия обучения, направленная на уменьшение влияния дисбаланса классов и доменного смещения, а также многоуровневая функция потерь, объединяющая CORAL focal loss и pairwise ranking loss. Результаты численных экспериментов на объединённом наборе EyePACS–APTOS–Messidor демонстрируют значительное улучшение показателей: MAE снижено до 0.01, F1-score достигает 1.0, что подтверждает высокую точность, устойчивость и корректное учёт упорядоченности классов. Интеграция текстовых признаков и автоматического детектирования поражений повышает интерпретируемость модели и обеспечивает явную связь между локальными изменениями и глобальной стадией заболевания. Предложенная архитектура может служить основой для клинических систем скрининга, повышая качество и воспроизводимость диагностики при разнообразии источников данных и высокой вариативности аннотаций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Diabetic Retinopathy - A Review / D. S. Pushparani [et al.] // Current Diabetes Reviews. – 2025. – V. 21, № 7. – P. E310524230559. – DOI: 10.2174/0115733998296228240521151050.
2. RADR: A Robust Domain-Adversarial-based Framework for Automated Diabetic Retinopathy Severity Classification / S. M. Monedero, R. Melin, P. Ricci, P. Radeva // Medical Imaging with Deep Learning. – 2024.
3. Equitable Deep Learning for Diabetic Retinopathy Detection Using Multidimensional Retinal Imaging with Fair Adaptive Scaling / Shi M., Zhao Y., Zhang Z., Yang L. // Translational Vision Science & Technology. – 2025. – V. 14, № 7. – P. 1–1.
4. Eyepacs, Aptos, Messidor Diabetic Retinopathy [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/ascanipek/eyepacs-aptos-messidor-diabetic-retinopathy/data> (дата обращения: 28.09.2025).
5. Koonce, B. ResNet 50 / B. Koonce // Convolutional Neural Networks with Swift for TensorFlow: Image Recognition and Dataset Categorization. – Berkeley, CA: Apress, 2021. – P. 63–72.
6. Strip R-CNN: Large Strip Convolution for Remote Sensing Object Detection / X. Yuan [et al.] // arXiv preprint arXiv:2501.03775. – 2025.
7. Faghri, F. MobileCLIP2: Improving Multi-modal Reinforced Training / F. Faghri, B. Tadas, R. Choksi // arXiv preprint arXiv:2508.20691. – 2025.
8. MedViT: A Robust Vision Transformer for Generalized Medical Image Classification / O. N. Manzari [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2023. – V. 157. – P. 106791. – DOI: 10.1016/j.compbiomed.2023.106791.
9. FiLM: Visual Reasoning with a General Conditioning Layer / E. Perez [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2018. – V. 32, № 1. – DOI: 10.48550/arXiv.1709.07871.
10. Santos, C. A New Approach for Detecting Fundus Lesions Using Image Processing and Deep Neural Network Architecture Based on YOLO Model / C. Santos, F. Santos, J. Ferreira // Sensors. – 2022. – V. 22, № 17. – P. 6441.
11. Wright, L. Ranger21: A Synergistic Deep Learning Optimizer / L. Wright, Demeure N. // arXiv preprint arXiv:2106.13731. – 2021.

Поступила в редакцию 29.09.2025 г., рекомендована к печати 20.10.2025 г.

**DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORK MODEL FOR ASSESSING THE SEVERITY OF
DIABETIC RETINOPATHY FROM OPHTHALMIC IMAGES WITH CLASS IMBALANCE
CONSIDERATION**

Poliakova V.E., Pikalev I.A.S.

This paper presents a multimodal neural network model, EYEPACS-ODR, designed for automated assessment of diabetic retinopathy (DR) severity from fundus images. The architecture integrates visual features extracted using MedViT-Large with textual descriptors of retinal lesions (MA, HE, EX, SE) generated automatically via the YOLOR-CSP detection module. To account for the ordinal nature of DR stages, the model employs the CORAL-Head ordinal regression module together with a multi-level loss function combining CORAL focal loss and pairwise ranking loss. To enhance robustness, a two-stage training strategy is introduced, allowing compensation for severe class imbalance and domain shift across EyePACS, APTOS, and Messidor datasets. Experimental results demonstrate high accuracy of the proposed model: F1-score = 1.00, MAE = 0.01, and stable reduction of the integrated loss function on the test set. The findings confirm the effectiveness of the multimodal approach and highlight its potential for integration into clinical DR screening systems.

Keywords: diabetic retinopathy, neural networks, ordinal regression, multimodal learning, medical diagnostics, fundus imaging, class imbalance.

Полякова Валерия Евгеньевна

стажёр-исследователь лаборатории
интеллектуальных систем и анализа данных
ФГБНУ «Институт проблем искусственного
интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: iaito89320@gmail.com

Poliakova Valeriia Evgenevna

Research Intern at Laboratory of Intelligent
Systems and Data Analysis of Institute of Artificial
Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Пикалёв Ярослав Сергеевич

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник лаборатории интеллектуальных систем и
анализа данных ФГБНУ «Институт проблем
искусственного интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i@pikaliov.ru

Pikalev IAroslav Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Senior
Researcher at Laboratory of Intelligent Systems
and Data Analysis of Institute of Artificial
Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ
ДЕФОРМАЦИИ В ТЕРМОУПРУГИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

© 2025 *Слободин А.Д., Селиванов В.Ф., Иванов А.В., Орлов Р.Е., Хвостов А.А.*

Рассмотрен подход к оценке эффектов связности теплового и механического полей термоупругих конструкций в процессах их термомеханической обработки. Для оценки эффекта связности предложена системная модель, включающая термоупругий объект, режимы его обработки и условия окружающей среды. Приведена расчётная схема и реализован вычислительный эксперимент на примере процесса холодного формования стали. Получены поля деформаций, напряжений и температур, проанализированы результаты моделирования и соответствие данным натурного эксперимента. Показана необходимость учета локального изменения температуры в зоне контакта с листовой заготовкой при анализе термонапряженного состояния металла, а также исследовании динамики условий, приводящих к разрушению материала. Предлагаемый подход может быть использован в процессах механической, тепловой обработки или холодной деформации термоупругих объектов.

Ключевые слова: математическое моделирование, термоупругость, эффект связности, тепловая диссипация.

Введение. Автоматизация технологических процессов машиностроения, приборостроения, трубной промышленности, строительства предполагает учёт термоупругости при механической, тепловой обработке или холодной деформации объектов [1, 2]. Математические модели технических систем и алгоритмы управления технологическими режимами их обработки, учитывающие взаимодействие теплового и механического полей (эффект связности [3]), позволяют оперативно адаптироваться к изменению температурных условий, управлять текущими и остаточными напряжениями и деформациями, выбирать теплофизические параметры, обеспечивающие заданные температурные зоны, проектировать и оценивать системы охлаждения или предварительного нагрева объекта обработки, прогнозировать поведение объектов в сложных термических условиях. Для учета эффекта связности в сопряженные нестационарные уравнения движения и сохранения энергии вводят слагаемые, формализующие двунаправленную связь механического и температурного полей [3], что усложняет расчетные схемы. Материалы объектов обработки обладают разной силой температурно-механической связи и характеризуются безразмерным коэффициентом связности, зависящим от упругих и теплофизических характеристик материала [4]. Существенным упрощением является принятие допущения об отсутствии или однонаправленности связности температурных и механических полей на основе свойств материала. Однако эти допущения при определённых условиях снижают точность оценки. Для определения таких условий помимо механических, теплофизических параметров материала требуется знать геометрическую форму и размеры объекта, режимные параметры обработки, задающие нестационарные силовые и температурные поля, в которых находится объект в ходе обработки.

Таким образом, необходимы сопряженные математические модели объекта и процессов его обработки, позволяющие провести вычислительные эксперименты для определения степени связности для заданного объекта в заданной технологической схеме.

Математические модели сопряженных нестационарных термомеханических процессов в термоупругих конструкциях в ходе их обработки могут быть реализованы численно [5]. Описание 3D геометрии, задание механических и теплофизических свойств, а также имитация процесса их обработки реализуется в рамках прикладных программных пакетов Ansys, Comsol, FlowVision, OpenFoam и подобных [6].

Системная модель. Поскольку явления термомеханической связности проявляются в контексте технологического процесса обработки и условий окружающей среды, для принятия решения о типе термомеханической связности или её отсутствии при разработке технологического процесса обработки термоупругой конструкции и систем управления процессом предлагается системная модель. Она включает в себя термоупругий объект и режимы его обработки для прогнозирования эффектов тепловой диссипации энергии деформации в термоупругих конструкциях при термомеханической обработке (рис. 1).

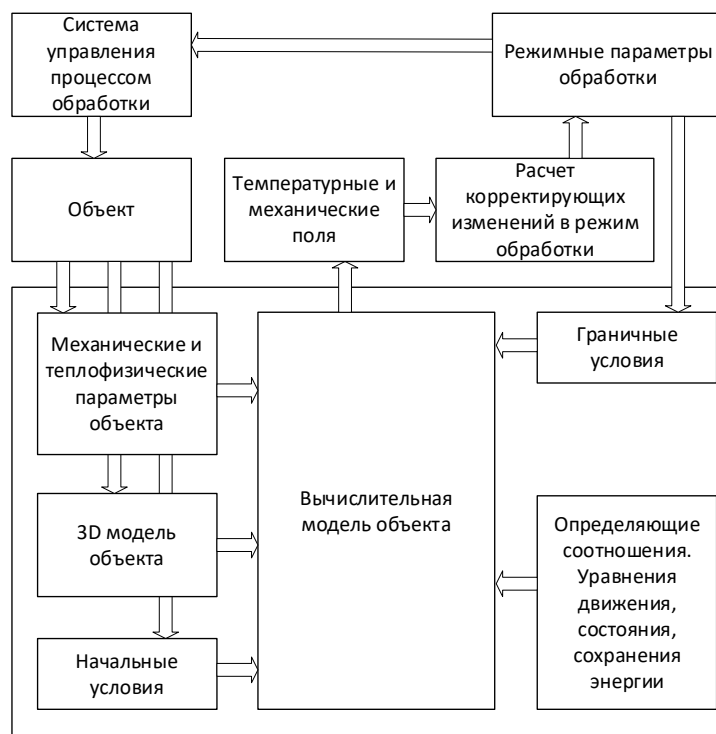


Рис. 1. Системная модель

Системная модель состоит из следующих элементов: подсистема термоупругой конструкции – 3D модель объекта, база теплофизических и механических свойств объекта на основе справочных данных и экспериментальных исследований при необходимости; вычислительная модель объекта на основе определяющих соотношений, включающая уравнения движения, состояния и сохранения энергии с учетом термомеханической связности; модель технологического процесса обработки термоупругой конструкции в виде зависимостей нестационарных тепловых и механических полей от режимных параметров, позволяющих осуществить их сопряжение с моделью объекта через граничные условия.

Исследование функционирования системы заключается в задании начального состояния объекта и расчета нестационарных температурных и механических полей в ходе процесса обработки. На заключительном этапе производится принятие решения об адаптации режимных параметров в соответствии с отклонениями рассчитанных полей от эталонных и передача этой информации в систему управления технологическим процессом, или делается вывод о незначимости влияния термомеханической связности на показатели качества продукта после обработки.

Рассмотрим применение предлагаемого подхода на примере холодного дискретного формования в технологическом процессе изготовления труб для нужд ЖКХ, нефтегазовой и химической промышленности. В процессе формования происходит последовательная деформация листовой заготовки для придания ей заданной технологией формы. В ходе деформации на поверхностях листа происходит рост напряжений растяжения (сжатия) в материале, которые приводят к локальным изменениям физико-механических характеристик металла в зоне контакта, а процессы диссипации механической энергии и термоупругости в металле приводят к локальному изменению температуры в зонах контакта формирующего пуансона и опорных валов с листовой заготовкой [7, 8]. Это приводит к необходимости проведения теплотехнических расчётов технологических режимов формования с учетом изменения энтальпии листовой заготовки и локальных температурных полей в зоне контакта с пуансоном пресса.

Для точного анализа поведения материала, механизмов образования трещин, разрывов, изломов практический интерес представляет оценка распределений температуры и физико-механических свойств металла в объеме листовой заготовки в процессе формования [9, 10].

Математическая модель. Основные допущения, принятые при разработке математической модели: ввиду существенно меньших размеров толщины листовой заготовки по сравнению с линейными размерами зоны контакта с пуансоном формирующего пресса в рамках математической модели рассмотрено 2D сечение плоскости, планарной к направлению силового воздействия (рис. 2).

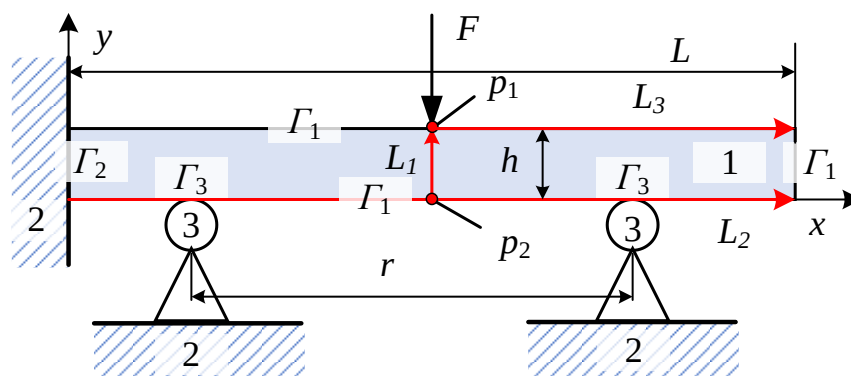


Рис. 2. Расчётная схема

Связь напряжений и деформаций формализована в рамках теории линейной упругости законом Гука для изотропной среды при отсутствии массовых сил; основные теплофизические параметры металла (плотность, теплоёмкость и теплопроводность) приняты постоянными, а механические свойства (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) заданы функциями температуры; в сопряженной задаче учитываются механизмы диссипации механической энергии и термоупругий эффект;

теплообмен с окружающей средой осуществляется по механизму естественной конвекции, а теплообмен с пуансоном прессы не учитывается.

Расчётная схема, представленная на рис. 2, показывает 2D сечение листовой заготовки 1, заделку 2, скользящие заделки 3 (контакт с опорными валами), Γ_1 – свободные границы сечения, Γ_2 – граница с заделкой 2, Γ_3 – граница со скользящими заделками, L_1, L_2, L_3 – контрольные линии для исследования распределений параметров модели, F – внешняя сила, p_1, p_2 – контрольные точки для исследования изменений параметров модели.

С учётом принятых допущений заданы основные определяющие соотношения модели.

Уравнение сохранения энергии, формализующее процесс теплопереноса в стальной конструкции [11]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda \nabla T] + Q_d + Q_h, \quad (1)$$

где t – время, с; T – температура, К; ρ – плотность, кг/м³; c_p – изобарная удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); λ – теплопроводность, Вт/(м·К), Q_h – удельная мощность диссипируемой механической энергии, Вт/м³, Q_d – удельная мощность энергии термоупругого демпфирования, Вт/м³.

Начальные условия $T|_{t=0} = T_0$, где T_0 – начальная температура. Граничные условия на внешних границах сечения Γ_1, Γ_3 задают условие теплоизоляции $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, на Γ_2 условие конвективной теплоотдачи от поверхности листа к окружающему воздуху $-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T|_{\Gamma_2} - T_\infty)$, где $\bar{n}$ – единичный нормальный к поверхности вектор. α – коэффициент теплоотдачи от поверхности изделия к окружающей среде, Вт/(м²·К), T_∞ – температура окружающей среды, К;

Значение коэффициента теплоотдачи оценивалось по эмпирической зависимости [6]:

$$\alpha = 9,3 + 0,058(T - 273,15). \quad (2)$$

Уравнение равновесия

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \bar{\sigma}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}$ – тензор напряжений, Па.

Связь напряжений и деформаций с учётом термических деформаций описывается законом Гука [12]. При этом используется допущение о аддитивности упругой и неупругой составляющей деформации

$$\bar{\sigma} = \bar{C} : (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{th}), \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – общий тензор деформаций, являющийся суммой перемещений за счёт упругой и неупругой (термической) составляющей $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{el} + \bar{\varepsilon}_{th}$.

Общий тензор деформаций связан с вектором перемещений:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[\left(\nabla \bar{u} \right)^T + \nabla \bar{u} \right], \quad (5)$$

где $\bar{u}$ – вектор перемещений с компонентами $u_i = x_i - X_i$ (где x и X координата точки до и после деформации), i – порядковый номер размерности пространства, $\bar{\bar{C}}$ – тензор упругости, связывающий напряжения и деформации в законе Гука, и определяется параметрами упругой среды, T – операция транспонирования.

Тензор упругости определяется упругими свойствами материала и задается матрицей упругости D через механические свойства среды с помощью модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν [13]:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Неупругая термическая составляющая деформации для изотропной среды определяется коэффициентом объёмного расширения β и пропорциональна разнице текущей и референтной температур [14]:

$$\bar{\varepsilon}_{th} = \beta (T - T_{ref}) \bar{\bar{I}}, \quad (7)$$

где $\bar{\bar{I}}$ – единичный тензор, T_{ref} – температура, относительно которой производится расчёт, К.

Удельная мощность диссипируемой механической энергии, Вт/м³:

$$Q_h = \bar{\tau} : \bar{\dot{\varepsilon}}, \quad (8)$$

где $\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t}$ – тензор скорости деформации, 1/с, $\bar{\tau}$ – тензор неупругих напряжений, Па.

Удельная мощность энергии термоупругого демпфирования:

$$Q_h = -T \frac{\partial}{\partial t} S_{el}, \quad (9)$$

где S_{el} – упругая энтропия $S_{el} = \beta I_1 (\bar{\bar{\sigma}})$, Дж/(К·м³); где I_1 – первый инвариант тензора напряжений, в плоской постановке $I_1 = (\sigma_x + \sigma_y)$.

В начальный момент времени система находится в состоянии покоя $\bar{u}|_{t=0} = 0$,

$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}|_{t=0} = 0$. На закрепленной поверхности Γ_2 задано отсутствие перемещений $\bar{u} = 0$.

Поверхности Γ_1 полагаются свободными.

Удельная формирующая переменная сила $\bar{F}(t)$, Н/м² задана нормальной поверхности листовой заготовки:

$$\bar{\sigma} \cdot \bar{n} = \bar{F}(t), \quad (10)$$

где $\bar{n}$ - вектор нормали к поверхности листовой заготовки перед деформированием.

В местах контакта с опорными валками заданы условия скольжения:

$$\bar{u} \cdot \bar{n} = 0. \quad (11)$$

Для оценки порога начала пластической деформации использованы напряжения по Мизесу [15], которые рассчитываются из тензора напряжений:

$$\sigma_{mis} = \sqrt{3I_2(\bar{\sigma})}, \quad (12)$$

где $I_2(\bar{\sigma}) = \frac{1}{2} \bar{\sigma} : \bar{\sigma}$ – второй инвариант тензора напряжений $\bar{\sigma}$, Па.

Математическая модель (1-10) позволяет формализовать эволюцию температурных, деформационных полей и полей напряжений в процессе дискретного холодного формования.

Вычислительный эксперимент. Решение задачи (1)-(12) осуществлено численно методом конечных элементов в среде Comsol Multiphysics™. Расчётная сетка состояла из 4796 элементов. Использован неявный решатель на основе формулы обратного дифференцирования (BDF) и метода Ньютона [16, 17]. В качестве модельной среды выбрана конструкционная сталь из библиотеки Comsol Multiphysics™, геометрические и силовые параметры соответствовали листовым заготовкам для изготовления труб диаметром 0,406 м и толщиной стенки 0,021 м с использованием гидравлического трубного формирующего прессы SKEM-JCO 12000tonn Sung Kwang Engineering & Manufacturing Co., Ltd (Korea). Параметры вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры вычислительного эксперимента

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Изобарная удельная теплоёмкость	c_p	475	Дж/(кг·К)
2	Коэффициент теплопроводности	λ	44,5	Вт/(м·К)
3	Плотность	ρ	7850	кг/м ³
4	Коэффициент теплового расширения	β	$12,3 \cdot 10^{-6}$	1/К
5	Модуль Юнга	E	$200 \cdot 10^9 \left[1 - 3,34 \cdot 10^{-4} (T - 293,15) \right]$	Па
6	Коэффициент Пуассона	ν	$0,3 \left[1 + 10^{-4} (T - 293,15) \right]$	безразмерная
7	Длина сечения	L	2	м
8	Высота сечения	h	0,021	м
9	Ширина пуансона	d	0,08	м
10	Расстояние между опорными валами	r	0,047	м
11	Коэффициент теплоотдачи	α	11,04	Вт/(м ² ·К)
12	Температура окружающей среды	T_∞	293	К

В приведенной постановке задачи возникает несогласованность начальных и граничных условий для уравнения движения в зоне контакта с формирующим элементом. Кроме того, формализация удельного формирующего усилия с помощью функции Хэвисайда и одновременное наличие в математической модели производных по времени в (8), (9) приводит к сингулярности.

Для согласования начальных и граничных условий, а также управления формирующей силой введена сигмоидная управляющая функция в виде модифицированной сглаженной функции Хэвисайда $\tilde{\theta}(t)$ [18]:

$$\tilde{\theta}(t) = \theta_{Low} + \frac{\theta_{Up} - \theta_{Low}}{1 + e^{-2s(t-t^*)}},$$

где $\theta_{Low}, \theta_{Up}$ – нижнее и верхнее значение управляющей функции в точке разрыва, $1/s$; s – параметр, задающий время перехода, $1/s$; t^* – время средней точки перехода, s .

Граничное условие (10) с учетом управляющей функции переписывается в виде:

$$\bar{\sigma} \cdot \bar{n} = \bar{F}_{max} \tilde{\theta}(t),$$

где $\bar{F}_{max}$ – максимальное значение силового воздействия, $\theta_{Up} = 1$, $\theta_{Low} = 0$.

В соответствии с (8), (9) интенсивность нагрева определяется скоростью изменения деформации, а, следовательно, и скоростью силового воздействия (управляющей функции $\tilde{\theta}(t)$):

$$\bar{F}_{max} \tilde{\theta}'_t(t) = \bar{F}_{max} \left[\theta_{Low} + \frac{\theta_{Up} - \theta_{Low}}{1 + e^{-2s(t-t^*)}} \right]'_x = \frac{2\bar{F}_{max}s(\theta_{Up} - \theta_{Low})e^{-2s(t-t^*)}}{\left[1 + e^{-2s(t-t^*)} \right]^2}. \quad (13)$$

Для оценки средней скорости изменения формирующей силы на участке действия можно использовать значение скорости в точке перегиба управляющей функции $\tilde{\theta}(t)$, характеризующей равновесное положение на управляющей сигмоидной функции.

Точка перегиба находится из условия:

$$\bar{F}_{max} \tilde{\theta}''_{tt}(t) = \frac{4\bar{F}_{max}s^2(\theta_{Up} - \theta_{Low})e^{-2s(t-t^*)} \left[1 - e^{-2s(t-t^*)} \right]}{\left[1 + e^{-2s(t-t^*)} \right]^3} = 0.$$

То есть при $t=t^*$, то есть

$$\tilde{\theta}'_t(t^*) = \frac{\bar{F}_{max}s(\theta_{Up} - \theta_{Low})}{2}.$$

Для оценки средней скорости изменения формирующей силы на заданном временном промежутке $[t_0, t_k]$ по теореме о среднем для производной (13) средняя скорость определится как:

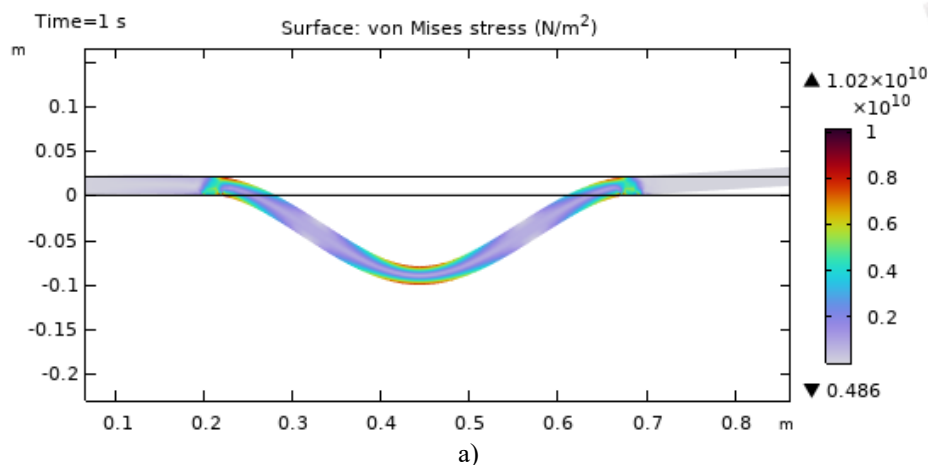
$$\begin{aligned}\bar{F}_{\max} \tilde{\theta}'_t &= \frac{\bar{F}_{\max}}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} \tilde{\theta}'_t(t) dt = \frac{\bar{F}_{\max}}{t_k - t_0} \left[\frac{-(\theta_{Up} - \theta_{Low})}{1 + e^{-2s(t-t^*)}} \right]_{t_0}^{t_k} = \\ &= \frac{\bar{F}_{\max} (\theta_{Low} - \theta_{Up})}{t_k - t_0} \left[\frac{1}{1 + e^{-2s(t_k - t^*)}} - \frac{1}{1 + e^{-2s(t_0 - t^*)}} \right].\end{aligned}$$

Для оценки величины и характера температурных эффектов проведены вычислительные эксперименты, заключающиеся в деформации листовой заготовки с разной скоростью и расчете нестационарных полей, характеризующих её термонапряженное состояние. Для расчетов приняты свойства конструкционной стали из библиотеки Comsol Multiphysics. В ходе вычислительного эксперимента использованы три управляющие функции (рис. 5а) с параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 2. Параметры управляющей функции

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
1-я функция				
1.1	Верхний предел	θ_{Low}	1	безразмерный
1.2	Нижний предел	θ_{Up}	0	безразмерный
1.3	Середина перехода	t^*	0,25	°C
1.4	Длина перехода	τ	0,5	°C
2-я функция				
1.1	Верхний предел	θ_{Low}	1	безразмерный
1.2	Нижний предел	θ_{Up}	0	безразмерный
1.3	Середина перехода	t^*	0,5	°C
1.4	Длина перехода	τ	1	°C
3-я функция				
1.1	Верхний предел	θ_{Low}	1	безразмерный
1.2	Нижний предел	θ_{Up}	0	безразмерный
1.3	Середина перехода	t^*	1	°C
1.4	Длина перехода	τ	2	°C

Результаты вычислительного эксперимента. В результате расчетов для всех условий таблиц 1, 2 получены поля деформаций, напряжений и температур (рис. 3а, 3б).



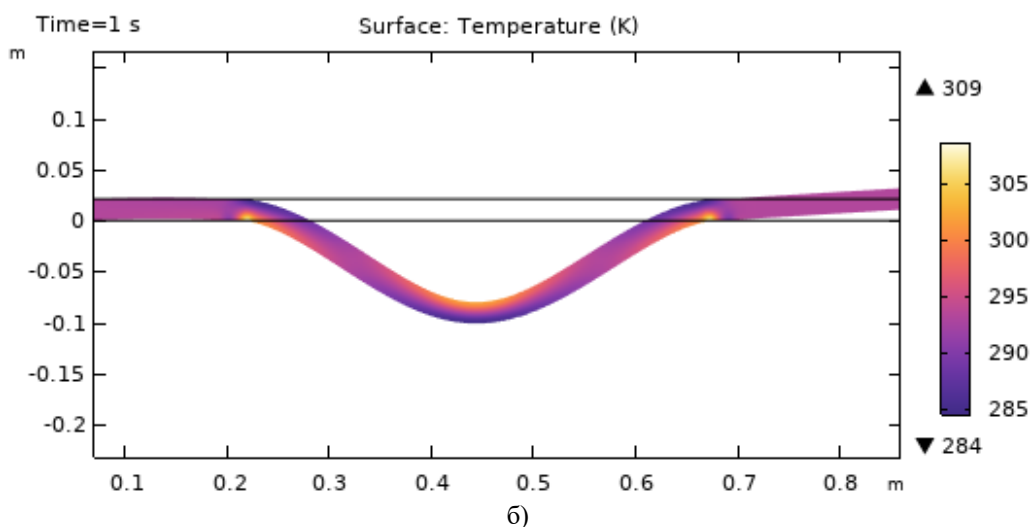


Рис. 3. Фрагмент поля напряжений по Мизесу (цветовая шкала), перемещений (а), температура (б) (время перехода 1 с)

Как видно из рис. 3а максимальная концентрация напряжений локализуется в областях контакта границы сечения с пуансоном прессы и опорных валов, снижаясь до нулевых значений по мере удаления от области контакта. Одновременно наблюдается локальное повышение температуры в зоне напряжений сжатия и её снижение в области напряжений растяжения (рис. 3б). При удалении от контактной зоны температура стремится к значению, равному температуре окружающей среды.

Компоненты вектора смещений $\bar{u}$, представленные на рис. 4а, 4б отражают характер деформации на контрольной линии L_2 .

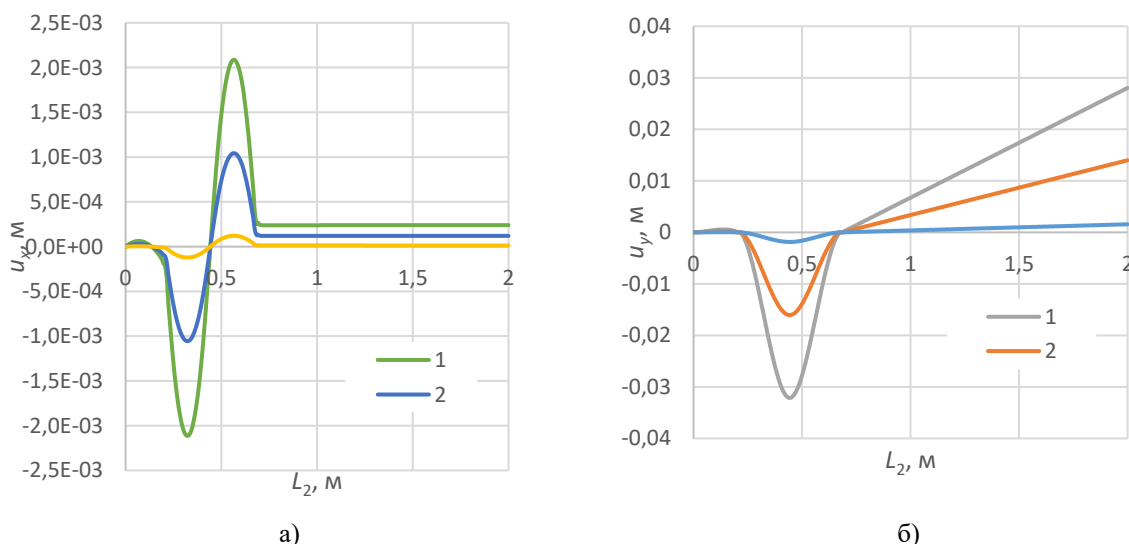


Рис. 4. Компоненты вектора перемещений на контрольной линии L_2 u_x (а) и u_y (б), для: $\bar{F}_{\max} = 18$ кН (1), 12 кН (2), 4 кН (3)

Компонент вектора смещений u_x (рис. 4а) характеризует деформации вследствие растягивающих напряжений, которые направлены от окрестности контакта и достигают экстремума на участке между областью контакта с пуансоном формирующего прессы и поверхностью опорного вала.

Увеличение формирующей силы воздействия при одной и той же формирующей силе приводит к увеличению амплитуды компоненты u_x (рис. 4а).

Рисунок 4б показывает компоненту u_y , отвечающую за деформацию в направлении формирующей силы и характеризует форму сечения листовой заготовки в результате деформации без учёта пластической составляющей.

На рисунке 5б показана динамика температуры в контрольных точках p_1 , p_2 , расположенных в верхней и нижней части сечения листовой заготовки на линии действия силы $\bar{F}_{\max}$ для управляющих функций 1-3 (рис. 5а).

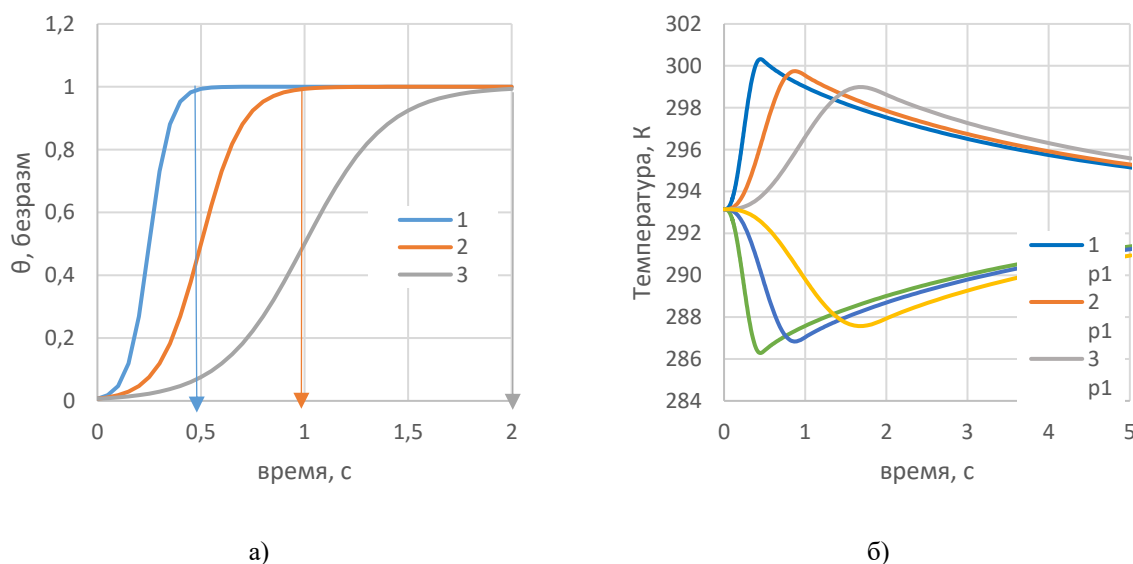


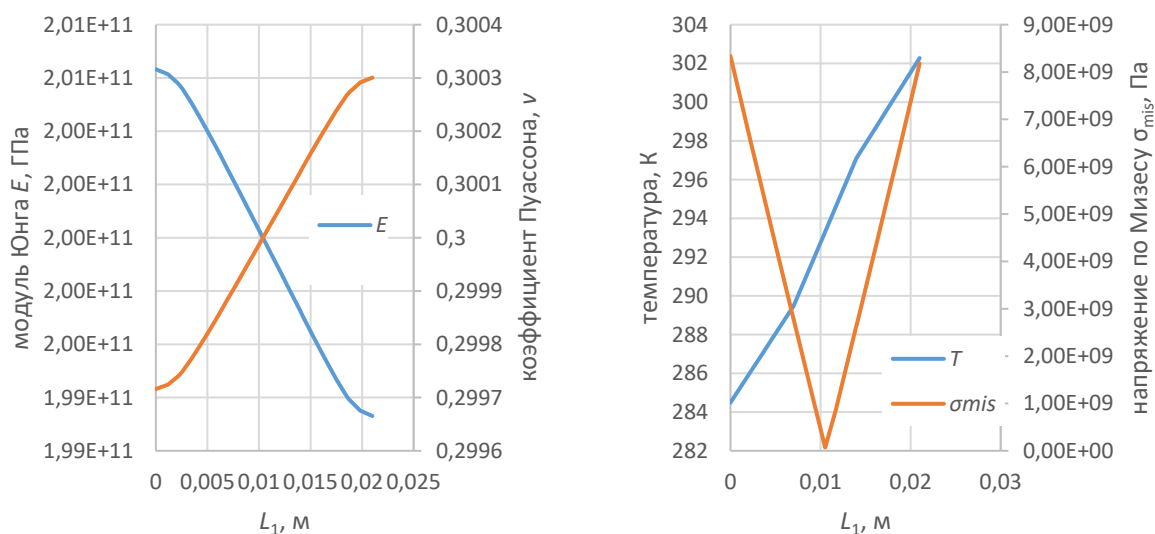
Рис. 5. Управляющие функции (а) длительность воздействия 0,5 с (1), 1 с (2) и 2 с (3); температура в контрольных точках p_1 , p_2 для управляющих функций 1-3 (б).

В точке p_1 , расположенной в зоне напряжений сжатия наблюдается повышение температуры в течение времени действия формирующей силы. Температурный максимум наблюдается в окрестности 85% от интервала действия силы, характеризующегося снижением скорости изменения управляющей функции. Противоположная картина наблюдается в контрольной точке p_2 , где действуют напряжения растяжения и происходит соответствующее снижение температуры (рис. 5б). В зависимости от скорости действия формирующей силы перепад температур между точками p_1 , p_2 изменяется от 13,9 К для управляющей функции 1 до 11,38 К для управляющей функции 3.

На рис. 6а показано распределение физико-механических свойств стали по высоте сечения листовой заготовки (контрольная линия L_1) в момент 0,5 с для управляющей функции 1. Модуль Юнга нелинейно снижается в направлении L_1 , что говорит о его снижении с ростом напряжений растяжения. Коэффициент Пуассона нелинейно возрастает в направлении L_1 с ростом напряжений растяжения. На рис. 6б показано распределение температуры и напряжений по Мизесу по высоте сечения листовой заготовки (контрольная линия L_1) в момент 0,5 с для управляющей функции 1.

Он отражает нагрев поверхности листовой заготовки в ходе деформации в зоне контакта и охлаждение на противоположной стороне, что обусловлено генерацией соответствующих напряжений. Напряжения сжатия-растяжения достигают своего максимума по модулю на поверхности листовой заготовки и уравниваются в его средней части (рис. 5б).

Изменение компонент вектора смещений не превысил 10^{-12} м, что свидетельствует об незначимом влиянии температурного поля, индуцируемого деформацией на механическое.



а) распределение модуля Юнга и коэффициента Пуассона по L_1

б) распределение температуры и напряжений по Мизесу по L_1

Рис. 6. Распределение в момент 0,5 с для управляющей функции 1

Сравнение результатов моделирования с данными натурального эксперимента.

Для проверки результатов моделирования проведен натурный эксперимент, заключающийся в тепловизионном контроле поверхности стального листа в процессе холодной формовки. В качестве объекта рассмотрен процесс формовки сварных труб из листа стали 10Г2ФБЮ толщиной 21 мм на гидравлическом трубном формующем прессе SKEM-JCO 12000tonn Sung Kwang Engineering & Manufacturing Co., Ltd (Korea). Для контроля температуры поверхности листа использован тепловизор CEM DT-9887. Полученные изображения обрабатывали в приложении CEM Thermview Pro. Ввиду невозможности размещения тепловизора в нижней части листа измерения осуществляли в зоне контакта с пуансоном прессы (рис. 7а).

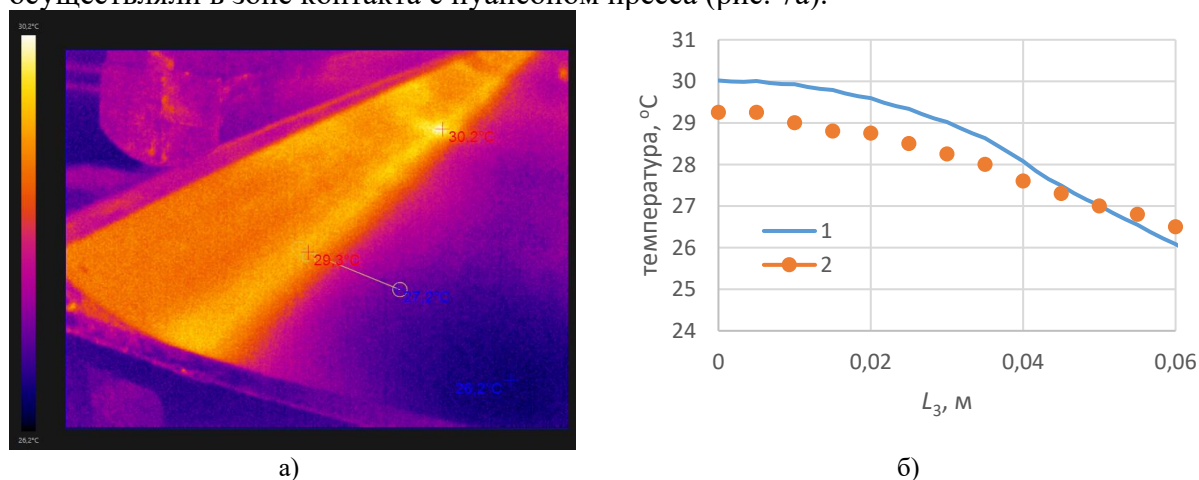


Рис. 7. Термограмма поверхности листа с выделенной контрольной линией (а), распределение температуры по контрольной линии L_3 (б) (1 – расчетное распределение, 2 – экспериментальные данные)

Физико-механические показатели стали (Модуль Юнга и коэффициент Пуассона) определены на универсальной гидравлической испытательной машине Lab Test 6.2500 «LABORTECH s.r.o.» в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84), плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности приняты по данным [19]. Траектория перемещения пуансона пресса и соответствующее время и скорость действия формирующей силы идентифицированы по трекингу его нижней кромки на видеозаписи. Температурное поле фиксировалось в момент окончания контакта с пуансоном пресса. Температура окружающего составила 25,5 °С. Ход пуансона составил 40 мм при его длительности 0,45 с.

Ошибка расчёта температуры по контрольной линии L_3 не превысила 0,75 °С (рис. 7б), что соответствует 5,4% от расчетного диапазона изменения температуры (14 °С).

Анализ результатов. Проведенное в рамках системной модели (рис. 1) моделирование нестационарных термомеханических полей в листовой стальной заготовке в ходе процесса холодного формования показало, что в данном технологическом процессе возникает локальный тепловой эффект в области контакта пуансона формирующего пресса с заготовкой, приводящий к отклонению температуры от начального значения от 11,38 К до 13,9 К в зависимости от скорости деформации, который необходимо учитывать при оценке термодинамического состояния поверхности листа.

Выводы. В соответствии с предлагаемым подходом разработана системная модель, включающая математическую модель термоупругого объекта (стального листового материала) и процесса его деформации на гидравлическом прессе при изготовлении сварных труб, позволившая прогнозировать поля напряжений, деформаций и температурные поля, формирующиеся в ходе формовки. Результаты проведенного вычислительного и натурного экспериментов показали, адекватность предлагаемой модели и приемлемую для целей управления процессом и анализа термонапряженного состояния в зоне контакта погрешность. Введенная в математическую модель управляющая функция, формализующая динамическое силовое воздействие позволила имитировать разные режимы формовки стальной листовой заготовки и анализировать возникающие в ходе формования поля напряжений, деформаций и температурные поля. Вычислительный эксперимент на примере показал необходимость учета локального изменения температуры в зоне контакта пуансона формирующего пресса с листовой заготовкой при анализе термонапряженного состояния металла в зоне контакта листовой заготовки с формирующим элементом, а также для исследования динамики условий, приводящих к разрушению материала.

Предлагаемый подход может быть использован при разработке новых и модернизации существующих технологических процессов механической, тепловой обработки или холодной деформации термоупругих объектов для оценки влияния явлений термоупругости на ход процесса и качество конечного продукта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Одинг, И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И. А. Одинг. – М: Металлургиздат, Машгиз, 1962. – 260 с.
2. Гаврюсев, В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций / В. И. Гаврюсев. – Л.: ЦНИИ «РУМБ», 1990. – 113 с.
3. Умов, Н. А. Избранные сочинения. Теория термомеханических явлений в твёрдых упругих телах / Н. А. Умов. – М.: Л.: Гостехиздат, 1974. – 575 с.

4. Валишин, А. А. Моделирование эффектов связанности в задаче об импульсном нагружении термоупругих сред / А.А. Валишин, Э. М. Карташов // Математическое моделирование и численные методы. – 2019. – №3. – С. 3-18.
5. Prevost, J. H. Finite element analysis of dynamic coupled thermoelasticity problems with relaxation times / J. H. Prevost, D. Tao // J. Appl. Mech. – 1983. – V. 50. – №4а. – P. 73-80.
6. Расчетные системы и Научное программное обеспечение [Электронный ресурс]. – URL: <https://store.softline.ru/sapr/science-software/> (Дата обращения 31.03.2025).
7. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
8. Коваленко, А. Д. Введение в термоупругость / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова Думка, 1965. – 204 с.
9. Смирнов, М. А. Высокотемпературная термомеханическая обработка и хрупкость сталей и сплавов / М. А. Смирнов, С. Н. Петрова, Л. В. Смирнов. – М.: Наука, 1991. – 167 с.
10. Дзугутов, М. Я Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М. Я. Дзугутов. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1977. – 480 с.
11. Yunus, A. C. Heat and mass transfer: fundamentals & applications / A. C. Yunus, J. G. Afshin. – fifth edition. – NY.: McGraw-Hill Education, 2015. – 972 p.
12. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебное для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
13. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости: учебное пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
14. Holzapfel, G. A. Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering / G. A. Holzapfel. – John Wiley & Sons, 2000. – 470 p.
15. Armenakas, A. E. Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity / A. E. Armenakas. – Boca Raton, 2006. – 992p.
16. Sowa, M. Comparison Of Time-Stepping Methods For Transient Magnetic Field Computations In Comsol Multiphysics / M. Sowa, D. Typanska // Electrical Engineering. – 2014. – № 77. – P. 141-147.
17. Chung, G. H. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized- method / G. H. Chung // J. Appl. Mech. – 1993. – №60. – P. 371-375.
18. Kanwal, R. P. Generalized Functions: Theory and Technique / R. P. Kanwal. – 3rd ed. – Boston: Birkhauser, 2004. – 456 p.
19. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали. Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.

Поступила в редакцию 18.07.2025 г., рекомендована к печати 15.08.2025 г.

PREDICTION OF THE EFFECTS OF THERMAL DISSIPATION OF DEFORMATION ENERGY IN THERMOELASTIC STRUCTURES DURING THERMO-MECHANICAL TREATMENT

Slobodin A.D., Selivanov V.F., Ivanov A.V., Orlov R.E., KHvostov A.A.

The article considers an approach to assessing the effects of connectivity of thermal and mechanical fields of thermoelastic structures in the processes of their thermomechanical processing. In mathematical models, a system model is proposed that includes a thermoelastic object, its processing modes and environmental conditions. A calculation scheme is given and a computational experiment is implemented. The fields of deformations, stresses and temperatures are obtained, the modeling results and compliance with the data of a full-scale experiment are analyzed. The need to take into account a local change in temperature in the contact zone with a sheet blank when analyzing the thermally stressed state of metal, as well as studying the dynamics of conditions leading to the destruction of the material is shown. The proposed approach can be used in the processes of mechanical, heat treatment or cold deformation of thermoelastic objects.

Keywords: mathematical modeling, thermoelasticity, connectivity effect, thermal dissipation.

Слободин Александр Дмитриевич

аспирант кафедры технологии сварочного производства и диагностики систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: slobodin2601@mail.ru

Slobodin Aleksandr Dmitrievich

Postgraduate Student at Department of Welding Production Technology and Diagnostics of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Селиванов Владимир Фёдорович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии сварочного производства и диагностики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: vf_selivanov@mail.ru

Selivanov Vladimir Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head at Department of Welding Production Technology and Diagnostics of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Иванов Андрей Валентинович

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления процессами и производствами ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: andrious@rambler.ru

Ivanov Andrei Valentinovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Automated Process and Production Control Systems of Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russian Federation, Voronezh.

Орлов Роман Евгеньевич

главный инженер АО «Лискимонтажконструкция»,
Российская Федерация, Воронежская обл., г. Лиски.
E-mail: krupin@liskifitting.ru

Orlov Roman Evgenevich

Chief Engineer of JSC «Liskimontazhkonstruktsiya»,
Russian Federation, Voronezh region, Liski.

Хвостов Анатолий Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
профессор кафедры информационных и управляющих систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: khvtol1974@yandex.ru

KHvostov Anatolii Anatolevich

Doctor of Technical Sciences, Professor at Department of Applied Mathematics and Mechanics Voronezh State Technical University,
Professor at Department of Information and Control of Systems Voronezh state University of Engineering Technologies,
Russian Federation, Voronezh.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ АКТИВНО-ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПОРТАТИВНЫЕ ПРИБОРЫ

© 2025 Бершадский И.А., Гладков А.Ю., Сечина М.В.

В данной научной работе рассматривается актуальная проблема обеспечения искробезопасности портативных (переносных) низковольтных устройствах с напряжением питания до 8 В, таким образом, чтобы при возникновении короткого замыкания или обрыва провода энергия не превосходила порогового значения, способного вызвать воспламенение. Получил развитие расчетный метод анализа электрических цепей на искробезопасность. Компьютерная модель метода основана на динамической модели дугового размыкания, учитывающей параметры цепи, скорость коммутации и условия воспламенения. Применение метода позволит на стадии разработки переносных приборов (головных светильников, газоанализаторов, пультов управления и т.д.) оптимизировать параметры их электрических схем.

Ключевые слова: искробезопасность, динамическая модель, дуговой разряд, низковольтные сети, компьютерное моделирование, воспламеняющая энергия, размыкание контактов, индуктивно-резистивная цепь, портативные приборы, MicroCap.

Введение. Искробезопасность — это технология передачи электроэнергии, которая предотвращает взрывы, гарантируя, что энергия, передаваемая в опасную зону, значительно ниже энергии, необходимой для инициирования взрыва.

Уровни энергии, доступные для передачи сигналов, невелики, но их достаточно для большинства систем контрольно-измерительных приборов, освещения, автоматики и др.

Анализ простых искробезопасных систем относительно прост и может быть выполнен по известным зависимостям кривых искробезопасности для индуктивных и емкостных цепей [1]. Однако некоторые более сложные системы, использующие комбинацию нелинейных и линейных источников энергии, требуют расчетных или экспериментальных методов оценки.

В работах [2, 3] был обоснован и апробирован метод оценки электровзрывобезопасности, в основе которого лежит динамическая модель дуговой коммутации в индуктивно-резистивной цепи. В рамках дальнейших исследований необходимо развить существующую динамическую модель искрового разряда. В частности, целесообразно оценить адекватность модели применительно к искробезопасным электрическим цепям, используемым в портативных (переносных) низковольтных устройствах с напряжением питания менее 8 В.

Данный метод расчета в сравнении с испытаниями во взрывной камере учитывает наиболее опасные условия коммутации для всех электрических цепей. Искрообразующий механизм не имеет возможности обеспечить весь диапазон токов и скоростей разведения контактов, что обуславливает более объективную оценку расчетного метода для всех видов электрических цепей.

Расширение области применения метода позволит на стадии разработки переносных приборов (головных светильников, газоанализаторов, пультов управления и т.д.) не только оценивать их искробезопасность, но и оптимизировать параметры их электрических схем.

Формирование динамической модели дугового размыкания резистивно индуктивной цепи произвольного вида. Компьютерная модель данного метода основана на уравнении Майра (1), характеризующее ток, напряжение, проводимость разряда и учитывает динамическую вольтамперную характеристику дуги, скорости коммутации, тепловую постоянную инерции дуги τ (с учетом динамических свойств плазмы разряда), баланс отводимой и поступающей мощности дуги:

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_d i_d}{P_d} - 1 \right), \quad (1)$$

где g – мгновенная проводимость дуги, См; t – текущее время разряда, с; τ – тепловая постоянная инерции дуги; u_d – мгновенное напряжение дуги; i_d – мгновенный ток дуги; P_d – отводимая от дуги мощность, Вт.

Отводимая от дуги мощность P_d представляется упрощенно с использованием статической вольтамперной характеристики дугового разряда $u_d = u_k + \left(ad + \frac{bd}{i_d} \right) vt$ в виде:

$$P_d = \left[u_k + E_{\text{д.ср}}(i_d) l_d \right] i_d = i_d (u_k + ad \cdot v \cdot t) + bd \cdot v \cdot t,$$

где l_d – длина дугового разряда (межконтактное расстояние), мм; u_k – минимальное значение катодного падения напряжения; для катода, изготовленного из кадмия, $u_k = 8\text{В}$; v – скорость размыкания контактов, мм/с; ad , bd – коэффициенты, характеризующие условия получения характеристик для ограниченных диапазонов начального тока дугового разряда: $ad = 82,81 \text{ В/мм}$, $bd = 2,42 \text{ В} \cdot \text{А/мм}$ при $i_d = 0,024 \dots 0,1 \text{ А}$ и $ad = 43,89 \text{ В/мм}$, $bd = 5,18 \text{ В} \cdot \text{А/мм}$ при $i_d = 0,05 \dots 2 \text{ А}$; t – время движения контактов, с; $E_{\text{д.ср}}$ – усредненное значение напряженности поля в столбе и анодной области дуги.

Постоянная инерции дуги τ зависит от тока разряда и радиуса столба. Если ограничиться температурами, не превышающими 10000 К [4] (слаботочные цепи), можно использовать одночленную степенную аппроксимацию тепловых функций дуги, для воздуха при атмосферном давлении. Для расчета τ в модели используется аналитическое выражение:

$$\tau = \frac{r_0^2 \cdot D_b \cdot \left(2\pi r_0 \sqrt{B_p} \right)^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}{i^{\frac{2(1-b)}{p+1}}},$$

где r_0 – расчетный радиус столба дуги, см; коэффициенты $B_p = 1,76 \cdot 10^{-7}$, $b = 0,25$, $D_b = 0,18$, $p = 3,5$.

Следует отметить, что было разработано два варианта расчетных методов [5]. В первом (модель – рис. 1) тепловая постоянная инерции дугового разряда τ определяется по максимальному значению усредненной мощности разряда. Это приводит к неоптимальной сходимости результатов моделирования.

Во втором учтено, что величина τ на протяжении дугового разряда в слаботочной цепи меняет свое значение в зависимости от мощности, поступающей в разряд при соблюдении баланса отводимой и поступающей мощности дуги. Это подчеркивает целесообразность определения величины τ не по максимальному значению средней мощности разряда, а с учетом мгновенных значений средней мощности разряда. Такой вариант имеет преимущества при анализе схем с «опережающим» отключением.

Расчетные схемы для оценки искробезопасности электрических цепей заданной конфигурации анализировались с применением симуляционного аналогового моделирования в удобном для получения пользовательского программного интерфейса в среде MicroCap 12 фирмы Spectrum Software. Компьютерная модель метода, представленная на рис.2, дает возможность получить исходные данные оценки: энергию разряда $W_p(T_p)$, длительность разряда T_p при различных скоростях разведения контактов vs . Также добавлена директива с расчетными коэффициентами для определения воспламеняющей энергии метано-воздушной смеси W_v при разных скоростях vs .

```
.OPTIONS ITL4=50
.DEFINE vs 6500
.define Td T-c_br
.define b1 TABLE(vs, 6500,5.804, 4000,0, 1800,0, 900,0, 300,0, 110,0,
46,7.046)
.define k1 TABLE(vs, 6500,-0.718, 4000,0, 1800,0, 900,0, 300,0, 110,0,
46,0.109)
.define b2 TABLE(vs, 6500,0.37, 4000,0.44, 1800,0.8, 900,1.1, 300,1.9, 110,3.7,
46,0)
.define b3 TABLE(vs, 6500,0.014, 4000,0.022, 1800,3.312, 900,2.1, 300,1.9, 110,1.691,
46,2.265)
.define k3 TABLE(vs, 6500,0.738, 4000,0.625, 1800,1.55, 900,0.869, 300,0.967,
110,1.13, 46,0.829)
.define tscale TABLE(vs, 6500,1e6, 4000,1e6, 1800,1e3, 900,1e3, 300,1e3, 110,1e3,
46,1e3)
.define Wd if(Td>if(vs>= 6500,2u,0),max(b1*pwr(Td*tscale,k1), max(b2,
b3*pwr(Td*tscale,k3))),0)*1e-3
.DEFINE Bp 1.76E-7
.DEFINE b 0.25
.DEFINE Db 0.18
.DEFINE p 3.5
.DEFINE c_br 1m
.DEFINE VD if(T<c_br,V(n),V(n)-8)
.DEFINE PD if(I(R0)*VD<0,0,I(R0)*VD)
.DEFINE r
TABLE(10.5,1.9,0.0104,2.4,0.012,2.5,0.0124,2.6,0.0128,2.7,0.0132,2.8,0.0135,2.9,0.0139,3,
0.0142,4,0.0169,5,0.0191,6,0.0211,7,0.0229,8,0.0243,9,0.026,10,0.0274,15,0.0334,20,0.0382,
30,0.0458,40,0.0519,50,0.0571,60,0.0617,80,0.0695,90,0.0729,100,0.0761,110,0.08,120,0.08
28,130,0.086,140,0.0885,150,0.092,170,0.0985,200,0.11,250,0.126)
.DEFINE tau ((r^2)*Db*(2*pi*r*sqrt(Bp))^(2*(1-b)/(p+1)))/(I(R0)^(2*(1-b)/(p+1)))
.DEFINE A if((T>c_br+2u) AND (SD(PD,c_br)>Wd),1,0)
```

```
.OPTIONS ITL1=250
.OPTIONS PIVREL=1
.OPTIONS GMIN=1e-006
.IC V(1)=0 V(2)=0 V(3)=0 V(4)=0
.IC I(LI)=9.21034
```

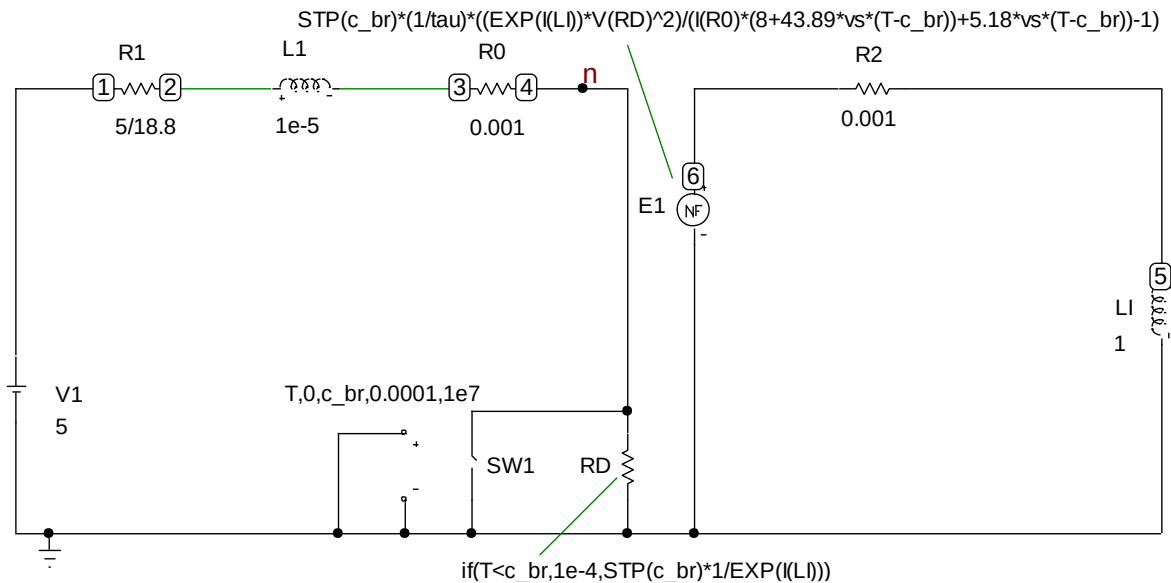


Рис. 1. Расчетная схема для оценки искробезопасной резистивно-индуктивной цепи

Рассмотрим особенности проведения вычислительных экспериментов в MicroCap. Сопротивление резистора RD (рис.1), моделирующего разряд размыкания, задано при помощи математического выражения:

$$RD = \text{if}(T < c_{br}, 1e-4, STP(c_{br}) \cdot 1 / \exp(I(LI))),$$

где T - текущее модельное время, с; c_{br} - момент начала коммутации цепи – размыкание ключа $SW1$, с; $STP(c_{br})$ - функция, принимающая «1» при $T \geq c_{br}$ и «0» в остальных случаях; if (условие, параметр 1, параметр 2) – функция, принимающая значение параметра 1 при выполнении условия и параметра 2 в противоположном случае.

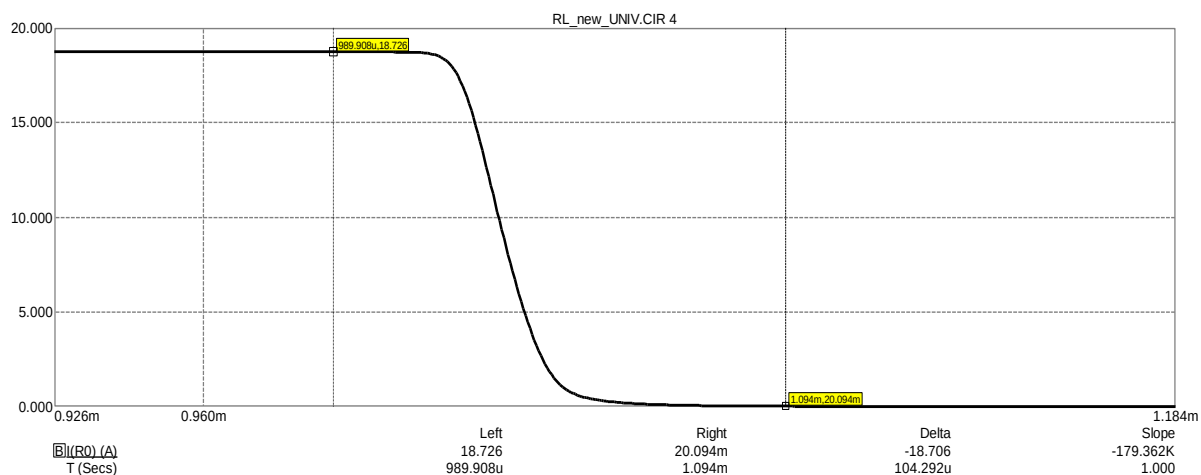
Ключ $SW1$ управляется по времени, служит для моделирования замкнутых контактов электрической цепи до коммутации. Для формирования этой проводимости использован источник напряжения $E1$ (рис.1):

$$STP(c_{br}) \cdot (1/\tau) \cdot ((\exp(I(LI)) \cdot V(RD)^2) / (I(R0) \cdot (8 + 43,89 \cdot vs \cdot (T - c_{br})) + 5,18 \cdot vs \cdot (T - c_{br})) - 1),$$

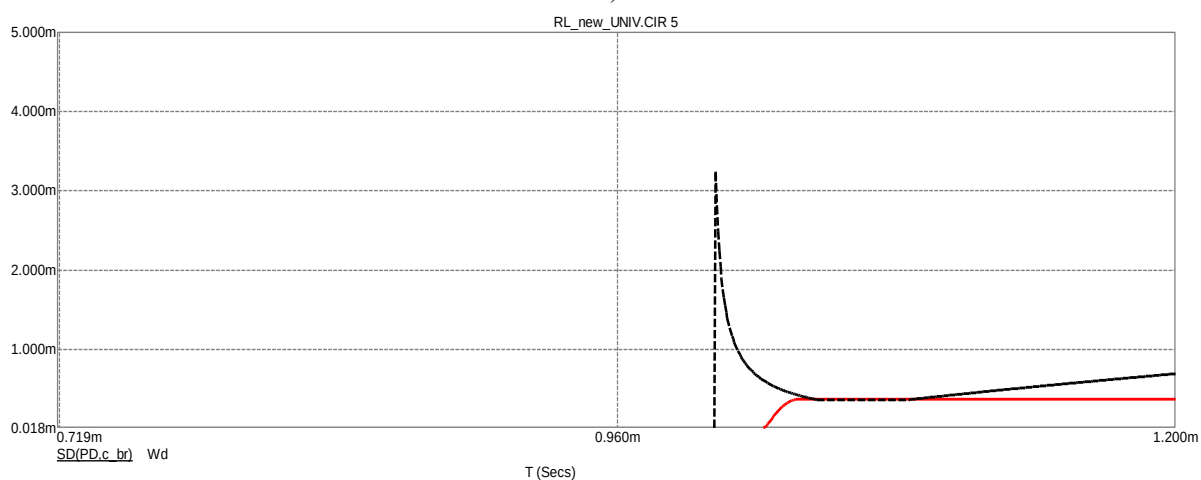
где vs – скорость коммутации; τ - постоянная времени дуги; T – текущее модельное время.

Токовая цепь содержит вспомогательный резистор $R0$ сопротивлением 0,001 Ом, на котором фиксируется ток разряда. Ток через дополнительную индуктивность $LI = 1$ Гн определяет интеграл от напряжения источника $V(E1)$, т.е. $I(LI) = \ln(g)$.

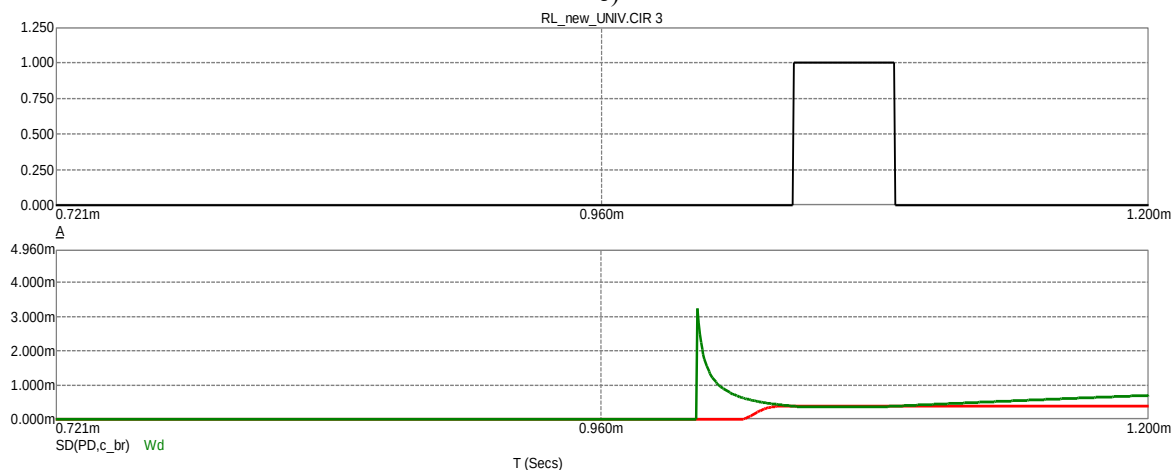
Результаты моделирования проиллюстрированы рис 2.



а)



б)



в)

Рис. 2. Осциллограммы разряда размыкания активно-индуктивной цепи: а) сила тока $I(R0)$; б) энергия разряда SD и минимальная воспламеняющая энергия Wd ; в) триггер опасности цепи $A = \langle 1 \rangle$

Для оценки искробезопасности с индуктивными нагрузками могут быть использованы характеристики искробезопасности $I_b = f(L, E)$, полученные на основании экспериментальных исследований Р.Ю. Толченкина (рис. 3, таблица 1) [6, 7].

Они соответствуют активизированному составу взрывоопасных испытательных электрических цепей и получены путем уменьшения в 1,5 раза значений минимальных воспламеняющих токов для метановоздушной смеси.

Сравнение с моделью размыкания индуктивно-активной цепи проведено при напряжении источника питания $E=5$ В и изменении $L=2\cdot 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$ Гн. Определялся минимальный воспламеняющий ток, энергия и длительность разряда.

Анализ показывает, что полученные расчетом и с помощью эксперимента значения искробезопасных токов в изученном диапазоне совпадают с приемлемой точностью. Это подтверждает факт, что нагрев контактов искрообразующего механизма в результате протекания по ним токов до 12 А не влияет на процесс воспламенения (не снижает уровень воспламеняющей энергии электрического разряда). При токах более 12 А может быть оказано влияние нагрева контактов на уровень воспламеняющих токов, что требует дальнейших исследований.

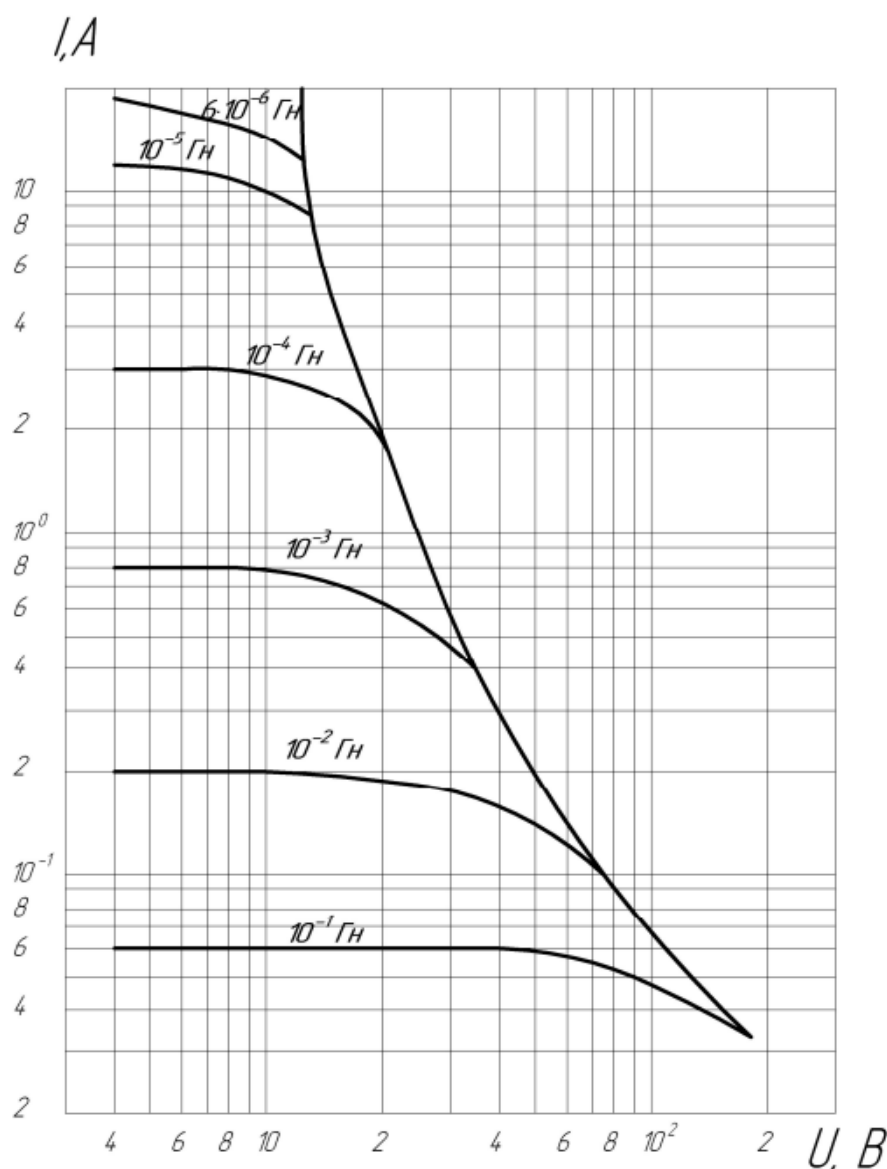


Рис. 3. Зависимости минимального воспламеняющего тока от э.д.с. источника питания и индуктивности цепи для водороднокислородной (85% H_2 + 15% O_2) смеси

Таблица 1. Данные, полученные из графика (рис. 3)

$E = 5 \text{ В}$	$L, \text{ Гн}$	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Минимальный воспламеняющий ток	12	3	0,8	0,2	0,06
	Искробезопасный ток	18	4,5	1,2	0,3	0,09

Таблица 2. Аналитически полученные минимальные воспламеняющие токи для метановоздушной смеси (8,3% CH_4 + 91,7% воздух) в последовательной цепи постоянного тока - батареи $U=5\text{В}$ и RL – ветви

$L, \text{ Гн}$	$I, \text{ А}$	$R, \text{ Ом}$	$T_1, \text{ мс}$	$T_2, \text{ мс}$	$P_{\text{ср}}, \text{ Вт}$	$W_{\text{р}}, \text{ мДж}$	$T_{\text{р}}, \text{ мс}$	$W_{\text{доп}}, \text{ мДж}$
$2 \cdot 10^{-6}$	51,5		-	-	-	-	-	-
10^{-5}	18,8	0,265	3,021	3,094	10,5	0,385	73,2	0,37
10^{-4}	4,23	1,18	5,024	5,079	7,23	0,382	54	0,37
10^{-3}	1,12	4,464	3,028	3,086	5	0,386	58	0,37
10^{-2}	0,312	16,02	5,028	5,110	3,46	0,371	82,8	0,37
10^{-1}	0,1	50	20,036	20,143	3,14	0,490	111	0,452

Таблица 3. Допустимая энергия разряда $W_{\text{доп}}$ и его продолжительность $T_{\text{р}}$ при размыкании контактов с различными скоростями (0,046 м/с - 6,5 м/с) [3]

$I_{\text{обр}} = 20 \text{ мА}$			
$v = 6,5 \text{ м/с}$		$v = 0,046 \text{ м/с}$	
$W_{\text{доп}} = 5,804 (T_{\text{р}})^{-0,718}$	$T_{\text{р}} < 44 \text{ мкс}$	-	-
$W_{\text{доп}} = 0,37 (T_{\text{р}})^0$	$T_{\text{р}} = 44 \dots 90 \text{ мкс}$	$W_{\text{доп}} = 7,046 (T_{\text{р}})^{0,109}$	$T_{\text{р}} = 2 \dots 5 \text{ мс}$
$W_{\text{доп}} = 0,014 (T_{\text{р}})^{0,738}$	$T_{\text{р}} = 90 \dots 500 \text{ мкс}$	$W_{\text{доп}} = 2,265 (T_{\text{р}})^{0,829}$	$T_{\text{р}} = 5 \dots 10 \text{ мс}$

И.А. Бершадским, А.Ю. Гладковым, В.В. Иванчиковым проведены эксперименты по регистрации переходных процессов разрядов, возникающих при размыкании индуктивно-резистивных цепей постоянного тока напряжением питания ниже 8 В [8]. Для исследований переходных процессов тока и напряжения разряда размыкания разработан и изготовлен искрообразующий механизм (ИМ) с регулированием скорости размыкания (рис. 4)

Для регистрации экспериментальных зависимостей переходных процессов в омической, индуктивной и емкостной цепи с напряжением от 5 до 24 В (рис. 5) использовалась схема, содержащая следующие компоненты:

- стабилизированный блок питания постоянного тока с регулируемым выходом напряжения (БП);

- токоограничительный резистор $R1$, исключаяющий влияние энергии БП в цепи разряда;

- исследуемую RLC цепь с элементами $C1, L1, R2$;

- кнопку $S1$, позволяющую исследовать как RLC так и RC цепи;

- кнопки $S2, S3$, позволяющие производить смену полярности напряжения на элементы искрообразующего механизма (ИМ): вольфрамовую проволоку (WO) и кадмиевый диск (Cd);

- искрообразующий механизм ИМ;

- цифровой запоминающий осциллограф TPS2024 фирмы Tektronix с каналами 1 (OSC1) и 2 (OSC2) соответственно.

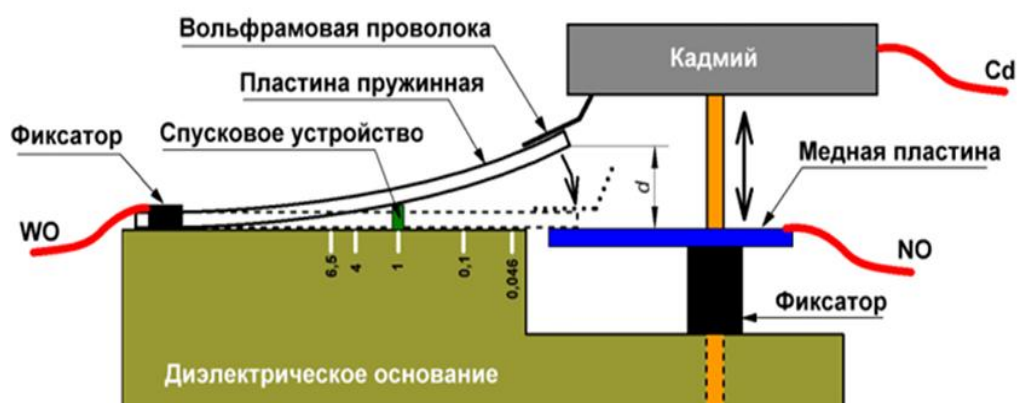


Рис. 4. Стенд для исследования разрядов размыкания в искробезопасной цепи

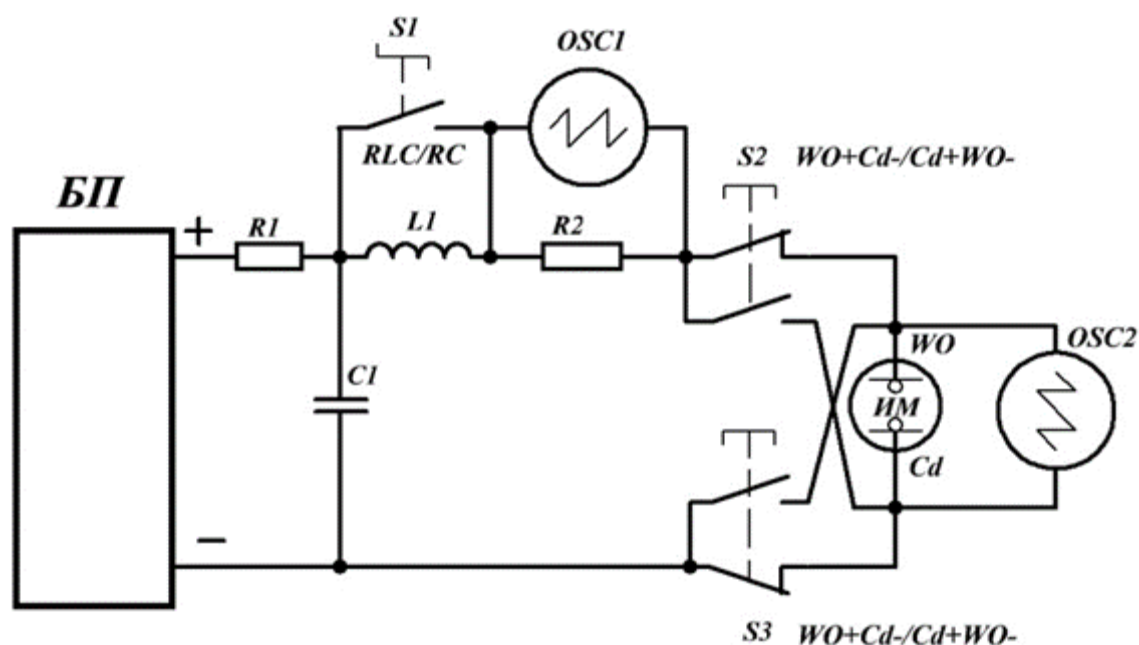
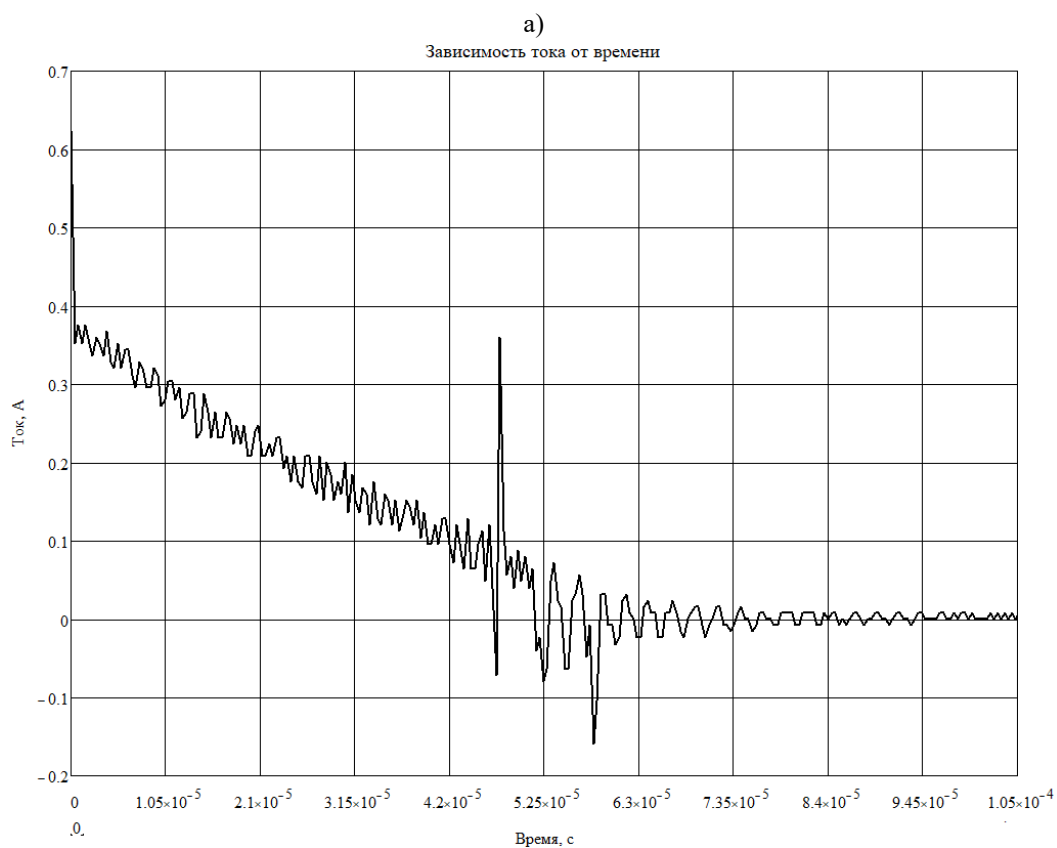
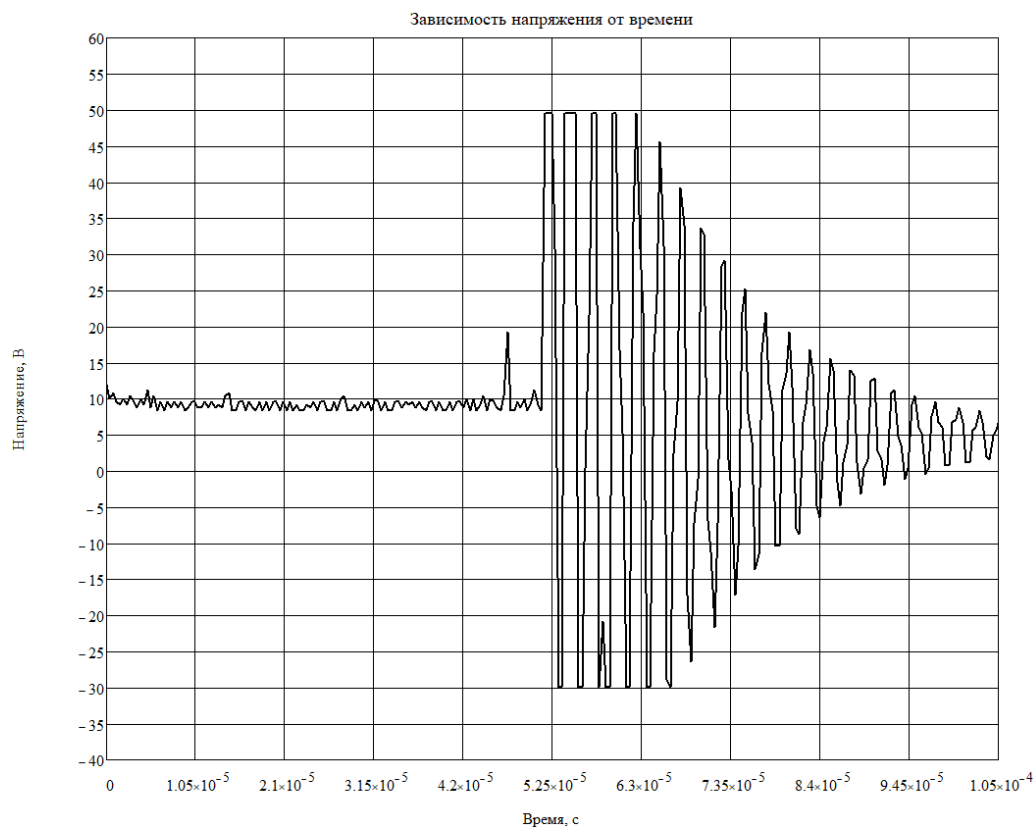


Рис. 5. Схема регистрации экспериментальных зависимостей

С помощью ИМ (рис. 4), подключенного по схеме (рис. 5) записаны переходные процессы разрядов размыкания цепи при напряжении 5В с чередованием полярности на контактах (рис. 6).

При индуктивности цепи 1 мГн физическая картина разряда практически не отличается от известной, полученной при напряжениях выше 12 В [5] - близкий к линейному спад тока и перенапряжение, вызванное ЭДС самоиндукции.

При малых индуктивностях, характерных для аккумуляторных источников питания, в начальный момент разряда размыкания наблюдается анодно-катодный скачек напряжения величиной 9-11 В в зависимости от полярности пары контактов кадмий-вольфрам. Его продолжительность невелика – около 0,8 мкс, что мало и не влияет на выделяемую в разряд энергию. При полярности вольфрам – анод, напряжение выше, но длительность разряда меньше на 20 %



б)

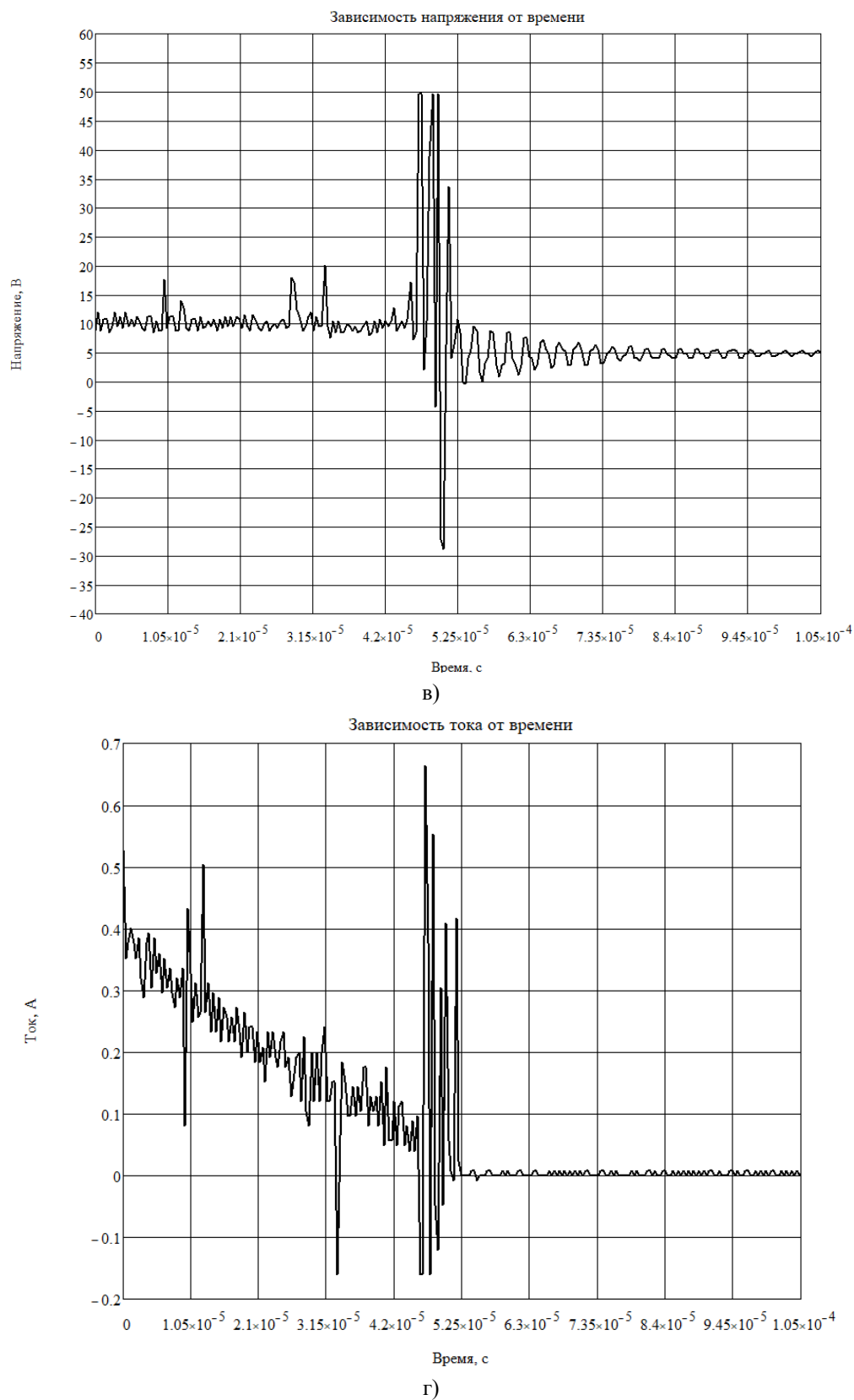


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока разряда размыкания в цепи с индуктивной нагрузкой (ток нагрузки - 0,5 А): а), б) – ЭДС 5 В, +Кадмий -Вольфрам, $L=1$ мГн; в), г) – ЭДС 5 В -Кадмий +Вольфрам, $L=1$ мГн

В фазе продолжительности разряда при ЭДС источника 5 В наблюдаются высокочастотные колебания, свидетельствующие о его неустойчивом, незаконченном характере, т.е. происходит восстановление напряжения на нем (рис. 7). Колебательный характер затухания тока характерен для цепи без индуктивной нагрузки и практически пренебрежим с увеличением индуктивной нагрузки.

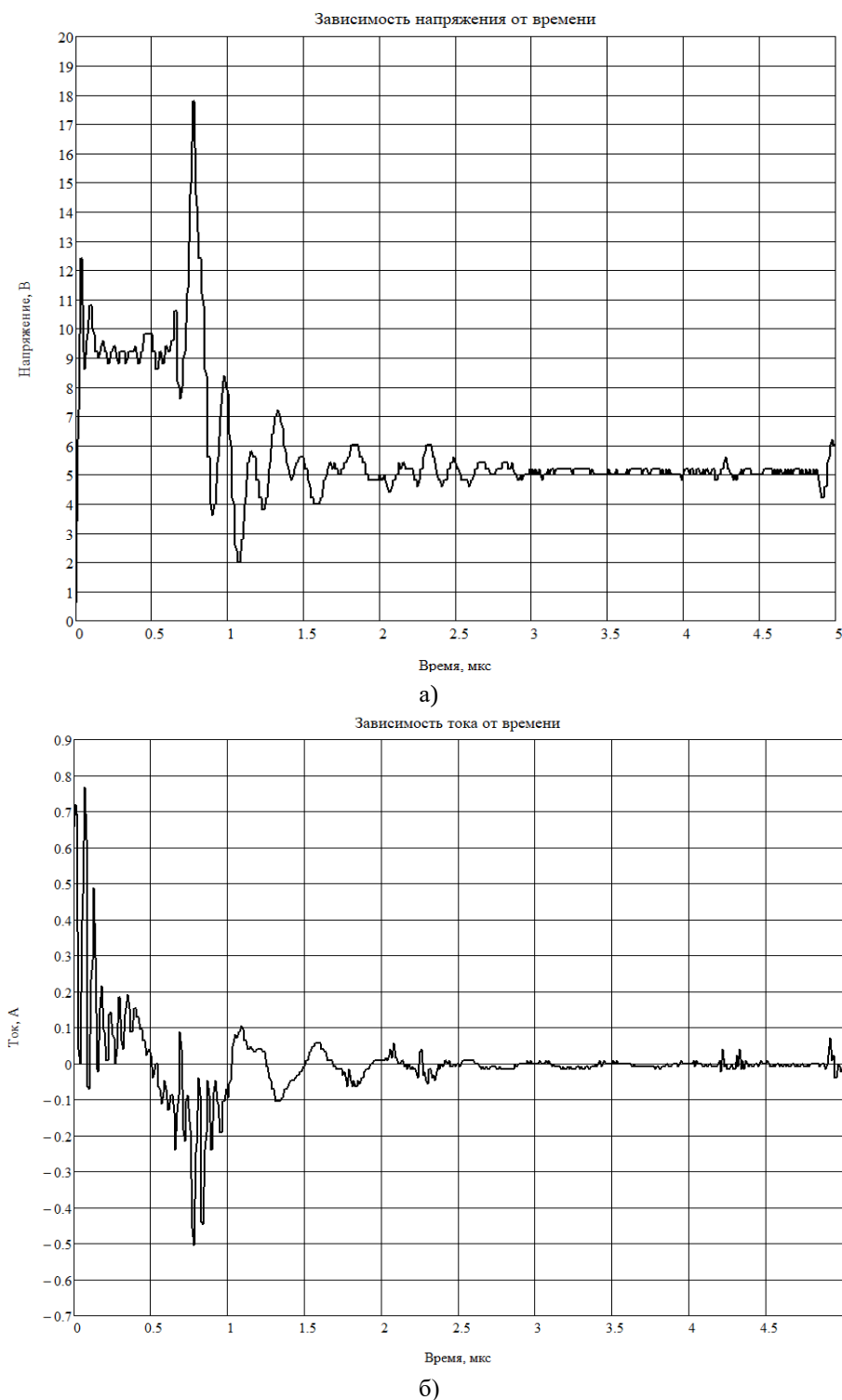


Рис. 7. Осциллограммы напряжения и тока разряда размыкания в цепи с малоиндуктивной нагрузкой (ток нагрузки - 1 А): а), б) ЭДС 5 В -Кадмий +Вольфрам, $L=2$ мкГн

Выводы:

1. Установлено, что при э.д.с. источника питания ниже минимального напряжения зажигания наиболее опасной по условиям взрывобезопасности пары контактов кадмий-вольфрам, цепь ведет себя как индуктивная, при этом, в начальный момент разряда размыкания происходит крактовременный анодно-катодный скачек напряжения величиной 9-11 В. При полярности приложенного напряжения $-Cd + W$ создается более устойчивый характер разряда.
2. Аналитическая модель коммутации при размыкании электрической цепи, основанная на уравнении Майра с учетом динамических свойств плазмы разряда, позволяет получать минимальные воспламеняющие токи для метановоздушной смеси, при этом расхождение при сравнении с экспериментами во взрывной камере не превышает 10% для токов до 12 А.
3. Получил развитие расчетный метод оценки искробезопасности слаботочных электрических цепей постоянного тока сложной конфигурации путём усовершенствования его математической модели процессов выделения энергии в разряд и совмещения с расчетами воспламеняющей энергии метано-воздушной смеси W_v при разных скоростях v_s в омических и индуктивных цепях.
4. Данный метод оценки параметров искробезопасных цепей апробирован для переносных приборов с напряжениями ниже 8 В, что дает возможность разработчикам определить граничные искробезопасные параметры для данных приборов и на их основе выбрать рациональные параметры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 31610.11–2014 (IEC 60079-11:2011). Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i»: межгосударственный стандарт: введен 2015-12-01. – М.: Стандартинформ, 2016 – 120 с.
2. Бершадский, И. А. Анализ электровзрывобезопасности на основе динамических моделей разряда при коммутации электрической цепи / И. А. Бершадский, А. Ю. Гладков, В. В. Иванилов // Электричество. – 2022. – № 2. – С. 19–28.
3. Бершадский, И. А. Развитие научных основ и методов создания искробезопасного электрооборудования для повышения безопасности труда горнорабочих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Бершадский Илья Адольфович; ДонНТУ. – Донецк, 2014. – 356 с.
4. Крижанский, С. М. К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления / С. М. Крижанский // Журнал технической физики. – 1965. – Т. 35, вып. 10. – С. 1882–1888.
5. Гладков, А. Ю. Обоснование параметров искробезопасных электрических цепей освещения в очистных выработках: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Александр Юрьевич Гладков. – Макеевка, 2021. – 158 с.
6. Ерыгин, А. Т. Установление исходных данных для оценки искробезопасности автономных источников питания в рудничных переносных приборах / А. Т. Ерыгин, Р. Ю. Толченкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S8. – С. 135-141.
7. Толченкин, Р. Ю. Разработка метода оценки и способов обеспечения искробезопасности рудничных переносных приборов и электрооборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Р. Ю. Толченкин; Институт проблем комплексного освоения недр РАН. – Москва, 2009. – 213 с.
8. Бершадский, И. А. О переходных процессах электрического разряда в цепи напряжением питания ниже 8 В / И. А. Бершадский, А. Ю. Гладков, В. В. Иванилов // Донбасс будущего глазами молодых ученых: сб. матер. науч.-техн. конф. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2021. – С. 183–187.

Поступила в редакцию 03.09.2025 г., рекомендована к печати 22.09.2025 г.

CALCULATED ASSESSMENT OF INTRINSIC SAFETY OF ACTIVE-INDUCTIVE ELECTRICAL CIRCUITS IN EXPLOSION-PROOF ELECTRICAL EQUIPMENT, INCLUDING PORTABLE DEVICES

Bershadskii I.A., Gladkov A.IU., Sechina M.V.

This scientific work addresses the topical problem of ensuring intrinsic safety in portable low-voltage devices with supply voltages up to 8 V, such that in the event of a short circuit or wire break, the released energy does not exceed the threshold value capable of causing ignition. The study further develops a computational method for analyzing the intrinsic safety of electrical circuits. The computer model of this method is based on a dynamic arc interruption model that accounts for circuit parameters, switching speed, and ignition conditions. Application of this method will enable optimization of electrical circuit parameters at the design stage of portable instruments—such as cap lamps, gas analyzers, control panels, etc.

Keywords: intrinsic safety, dynamic model, arc discharge, low-voltage circuits, computer simulation, ignition energy, contact interruption, inductive-resistive circuit, portable devices, MicroCap.

Бершадский Илья Адольфович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий и городов ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ibernsh164@yandex.ru

Bershadskii Ilia Adolfovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Power Supply for Industrial Enterprises and Cities of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гладков Александр Юрьевич

кандидат технических наук, заведующий лабораторией искробезопасности ГБУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности», Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: gladkov555@rambler.ru

Gladkov Aleksandr Iurevich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Explosion Safety Laboratory of Makeyevsky Scientific Research Institute for Safety of Work in the Mining Industry, Russian Federation, DPR, Makeevka.

Сечина Маргарита Викторовна

аспирантка кафедры электроснабжения промышленных предприятий и городов ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: sechina89@mail.ru

Sechina Margarita Viktorovna

Postgraduate Student, Department of Power Supply for Industrial Enterprises and Cities of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХ КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

© 2025 *Бирюков А.Б., Полхов С.В.*

В работе рассматриваются критерии эффективности работы групп котельных в масштабах производственных подразделений или теплогенерирующих предприятий в целом, а также эффективность отдельных котельных в разрезе всего предприятия. Предложенные критерии целесообразно использовать для определения очередности проведения мероприятий по модернизации котельных установок теплогенерирующих предприятий.

Ключевые слова: котельная, к.п.д., тепловая энергия, электрическая энергия эффективность, расход топлива.

Введение. В условиях крупной теплоснабжающей компании технико-экономическая эффективность деятельности предприятия зависит от показателей работы каждой котельной. Реконструкция котельных может быть обусловлена различными причинами. Решение задач приведения объектов теплоснабжения в работоспособное состояние является отдельным первоочередным вопросом.

Однако, когда формируются планы реконструкции котельных с целью повышения технико-экономических показателей их работы, важно ранжировать котельные в порядке приоритетности таких работ. Именно такой подход позволит избежать нерациональной траты средств и обеспечит достижение наибольшего положительного технико-экономического эффекта. Это важно как в целом в рамках теплоснабжающих предприятий Российской Федерации, так и в особенности для новых территорий, где имеет место крайне высокая степень износа оборудования котельных и тепловых сетей.

Постановка задачи исследования. На первый взгляд, достаточным критерием будет выступать величина, комплексно характеризующая технико-экономические показатели работы котельной, в то же время дающая возможность прямого перехода к экономическим характеристикам. В качестве такой характеристики мог бы выступить коэффициент полезного действия (к.п.д.) котельной [1-4]. Наиболее полно эффективность работы котельной характеризует к.п.д. нетто [1-3], однако его использование не удобно для последующего перехода к экономическим показателям.

Целесообразно при определении показателей эффективности котельных и сопоставлении их с показателями по всему предприятию учитывать также потребление электрической энергии.

При определении эффективности котельных в разрезе предприятия следует учитывать не только сами по себе показатели эффективности, но и удельный вес каждой рассматриваемой котельной в общей мощности теплогенерирующего предприятия. Также в дальнейшем важно предусматривать возможность представления показателей в виде базовой линии энергоэффективности [5].

Также необходимо выделить критерии, которые бы отображали потенциальные результаты проведения реконструкции с учетом изменения коэффициента полезного действия. Для отображения этих результатов в натуральном эквиваленте может послужить изменение расхода топлива котельной или группы котельных на выработку тепловой энергии.

Целью данной работы является разработка системы критериев, позволяющих оценить технико-экономические показатели работы отдельных котельных или групп котельных в разрезе предприятия или структурного подразделения.

Интегральный коэффициент полезного действия группы котельных установок. Целесообразно ввести понятие интегрального к.п.д. выработки и поставки потребителю теплоты от котельной (в дальнейшем просто интегрального к.п.д.) и коэффициента эффективности использования электрической энергии.

Интегральный к.п.д. произвольной (i -ой) котельной должен учитывать потери теплоты как в котельном агрегате, так и в оборудовании котельной. По физическому смыслу эта величина показывает, какая часть тепловой энергии, содержащейся в потребленном всей котельной топливе, выдана в тепловую сеть. Для i -ой котельной к.п.д. определяется согласно выражению [1-4]:

$$\eta_{n,i}^{zod} = \frac{Q_{выр,i}^{zod}}{Q_{m,i}} = \frac{Q_{выр,i}^{zod}}{B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p}.$$

Далее следует перейти от эффективности индивидуальной котельной к эффективности группы котельных или всех котельных предприятия или производственного подразделения. Это позволит сопоставить эффективность рассматриваемых котельных в разрезе общей эффективности предприятия.

Для группы котельных, структурного подразделения или предприятия интегральный КПД определяется по формуле:

$$\eta_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{выр,i}^{zod}}{\sum_{i=1}^n B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p},$$

или

$$\eta_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p \cdot \eta_{n,i}^{zod}}{\sum_{i=1}^n B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p},$$

где $Q_{выр,i}^{zod}$ – тепловая энергия, отпущенная котельной (котлоагрегатом) потребителю за рассматриваемый отопительный сезон, кВт·ч;

$B_{m,i}$ – расход топлива котельной за рассматриваемый отопительный сезон, м³(кг);

$Q_{n,i}^p$ – низшая теплота сгорания топлива, кВт·ч/м³или (кВт·ч/кг).

Потребление предприятием электрической энергии также является показателем эффективности работы (в первую очередь, вспомогательного оборудования котельной: электродвигателей насосных агрегатов, дымососов, дутьевых вентиляторов, оборудования КИПиА).

Интегральный коэффициент эффективности оборудования, потребляющего электрическую энергию, можно определить по формуле:

$$k_{эл} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{всп,i}^{zod}}{\sum_{i=1}^n Q_{выр,i}^{zod}},$$

где $W_{всп,i}^{200}$ - общее годовое потребление электрической энергии электродвигателями насосных агрегатов, тягодутьевых устройств, вентиляторов, щитов КИПиА, автоматики и др., кВт·ч.

Также предлагается ввести понятие добавочного коэффициента, который учитывает составляющую электрической энергии в общем потреблении котельной энергетических ресурсов:

$$e_i = 1 + \frac{W_{всп,i}^{200}}{B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p}.$$

Тогда для i -ой котельной к.п.д, учитывающий потребление электрической энергии, равен:

$$\eta_{e,i}^{200} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{выр,i}^{200}}{B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p \cdot e_i} = \frac{\eta_{np}}{e_i}.$$

Для группы котельных, структурного подразделения или предприятия можно использовать совокупный КПД, учитывающий потребление электрической энергии:

$$\eta_{np,e} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{выр,i}^{200}}{\sum_{i=1}^n B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p \cdot e_i}.$$

Применяя вышеуказанные показатели, необходимо соблюдать единые единицы измерения тепловой и электрической энергии, чтобы исключить возможную некорректность совместной обработки информации, а также упростить дальнейший расчет параметров эффективности в денежном эквиваленте.

Эффективность отдельной котельной в разрезе предприятия или структурного подразделения. Для определения удельной веса i -ой котельной в общем потреблении энергетических ресурсов и производительности предлагается использовать следующие коэффициенты:

- удельный коэффициент значимости i -ой котельной по потреблению топливных ресурсов:

$$\chi_i^T = \frac{B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p}{\sum_{i=1}^n B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p},$$

- удельный коэффициент значимости i -ой котельной по потреблению топливных ресурсов с учетом электрической энергии:

$$\chi_i^e = \frac{B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p \cdot e_i}{\sum_{i=1}^n B_{m,i} \cdot Q_{n,i}^p \cdot e_i},$$

- удельный коэффициент значимости i -ой котельной по подключенной нагрузке:

$$\chi_i^u = \frac{M_{\phi,np,i}}{\sum_{i=1}^n M_{\phi,np,i}},$$

где $M_{ф.нр.,i}$ – фактическая присоединенная нагрузка i -ой котельной, МВт.

При планировании реконструкции котельных или целых групп котельных важна рациональность расходования средств. Удельные коэффициенты значимости котельных можно использовать при определении очередности проведения мероприятий по реконструкции.

В реальных условиях эксплуатации котельных коэффициенты значимости могут отличаться – $\chi_i^T \neq \chi_i^e \neq \chi_i^H$. Чем значительнее отклонение между удельными коэффициентами значимости, тем выше дисбаланс между проектной и фактической удельной значимостью котельной в общей производственной мощности группы котельных или предприятия. Существенное превышение χ_i^T над χ_i^H говорит о крайне низкой экономической эффективности i -ой котельной в разрезе общей эффективности теплогенерирующего производства.

Повышение эффективности котельной или групп котельных. С точки зрения экономической эффективности, целью реконструкции котельной является снижение себестоимости отпускаемой потребителю тепловой энергии (производственные издержки). Наиболее существенная составляющая себестоимости тепловой энергии – расход топлива на производство отпускаемой тепловой энергии.

Повышение к.п.д. котельной на величину $\Delta\eta_{n,i}^{zod}$ приводит к следующему сокращению расхода топлива за отопительный сезон:

$$\Delta B_{m,i} = \frac{1}{Q_{n,i}^p} \cdot \frac{Q_{выр,i}^{zod} \cdot \Delta\eta_{n,i}^{zod}}{\eta_{n,i}^{zod} + \Delta\eta_{n,i}^{zod}}.$$

Для группы котельных:

$$\Delta B_m = \frac{1}{Q_n^p} \cdot \frac{Q_{выр}^{zod} \cdot \Delta\eta_{нр}}{\eta_{нр} + \Delta\eta_{нр}}.$$

Последовательное применение предложенных критериев позволяет выбрать объекты, для которых проведение реконструкции является наиболее целесообразным с точки зрения расходования средств, имеющихся в распоряжении предприятия для проведения мероприятий по модернизации.

Выводы. Модернизация котельных или групп котельных в масштабах теплогенерирующих предприятий связана как с существенными расходами, так и с рядом технических сложностей. В связи с этим, необходим научно обусловленный подход к анализу эффективности объектов в разрезе всего предприятия.

В работе предлагается использовать ряд критериев, позволяющих последовательно определить эффективность отдельных котельных или групп котельных в разрезе всего теплогенерирующего предприятия. Рассматриваемый подход разделен на несколько этапов: определение интегральных к.п.д. котельной или группы котельных без учета и с учетом потребления электроэнергии – определение удельного веса объектов в общей производственной мощности предприятия – определение потенциальной экономии топлива в зависимости от ожидаемого изменения к.п.д. в результате модернизации.

Использование предлагаемых критериев позволяет не только детально анализировать эффективность объектов теплоснабжения в разрезе предприятия в целом, но и избежать нерационального распределения ресурсов при планировании мероприятий по модернизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зах, Р. Г. Котельные установки / Р. Г. Зах. – М.: «Энергия», 1968 г. – 352 с.
2. Роддатис, К. Ф. Котельные установки: учеб. пособие для студентов неэнергетических специальностей вузов / К.Ф. Роддатис. – М.: «Энергия», 1977. – 432 с.
3. Либерман, Н. Б. Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения: (Общие вопросы проектирования и основное оборудование) / Н. Б. Либерман, М. Т. Нянкoвская. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
4. Делягин, Г. Н. Теплогенерирующие установки: учеб. для вузов / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
5. Сафьянц, С. М. Создание методики определения линий энергопотребления предприятия / С. М. Сафьянц, А. Б. Бирюков, А. С. Сафьянц // Вестник НТУ "ХПИ". – 2016. - № 9(1181). – С. 151-158.

Поступила в редакцию 10.09.2025 г., рекомендована к печати 29.09.2025 г.

EFFICIENCY CRITERIA FOR HEAT-GENERATING ENTERPRISES AND PRODUCTION UNITS OPERATING BOILER PLANTS

Biriukov A.B., Polkhov S.V.

The paper discusses the criteria for the efficiency of boiler groups on the scale of production units or heat-generating enterprises as a whole, as well as the efficiency of hotel boiler rooms in the context of the entire enterprise. The proposed criteria can be used to determine the priority of measures for modernizing boiler plants at heat-generating enterprises.

Keywords: boiler house, efficiency, thermal energy, electrical energy efficiency, fuel consumption.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Полхов Сергей Валерьевич

генеральный директор ГУП ДНР
«Донбасстеплоэнерго», соискатель ДонНТУ,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк,
E-mail psv800@bk.ru

Polkhov Sergei Valerevich

General Director of the State Unitary Enterprise DPR Donbassteploenergo, Applicant of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ РАЗНЫХ НАГРУЗКАХ В ЦЕПИ

© 2025 Хисматуллин А.С., Хасанов Д.Д.

В данной работе выполнено исследование температурного поля в системе охлаждения трансформаторного масла при разных нагрузках. Представлена созданная установка испытательного стенда, предназначенного для исследования температурного поля. Показан и описан принцип работы испытательного стенда по определению вклада, вносимого барботажем в общий процесс теплообмена. Представлены результаты проведенных опытов, показывающие перемешивание масла, вызываемого барботированием всплывающих пузырьков. В ходе работы был определен оптимальный режим работы силового масляного трансформатора на созданной лабораторной модели. Исследование имеет как научное, так и прикладное значение, поскольку открывает возможности для создания новых разновидностей систем охлаждения промышленных установок.

Ключевые слова: масляный трансформатор, нагрузка, теплопроводность, барботаж.

Введение. Силовые масляные трансформаторы широко используются в различных областях: энергетике, промышленности, городских сетях, транспорте [1-3].

Основная причина выхода из строя силовых масляных трансформаторов – это старение изоляции. Это комплексный процесс, который развивается со временем и обусловлен рядом факторов:

- тепловое старение: нагрев является естественным следствием работы трансформатора. Длительное воздействие повышенной температуры приводит к деградации изоляционных материалов. Происходит постепенное разрушение молекулярных связей, что снижает диэлектрическую прочность изоляции.

- электрические нагрузки: перегрузки, короткие замыкания, грозовые разряды и другие переходные процессы создают повышенные электрические напряжения в изоляции. Эти воздействия ускоряют процессы старения и могут приводить к пробоям.

- влажность: попадание влаги в трансформаторное масло и на изоляцию резко снижает их диэлектрические свойства. Это может произойти из-за негерметичности уплотнений, конденсации влаги из воздуха, или использования некачественного масла.

Когда изоляция теряет свою диэлектрическую прочность, она становится более уязвимой к электрическим воздействиям. Это может привести к:

- пробую изоляции: возникновение проводящего канала между обмотками, между обмоткой и сердечником, или между обмоткой и корпусом. Это вызывает короткое замыкание, что приводит к резкому увеличению тока и, как следствие, к дальнейшему разрушению трансформатора.

- перегреву: поврежденная изоляция может стать причиной образования локальных зон перегрева, которые ускоряют деградацию других изоляционных материалов и могут привести к возгоранию.

Таким образом, в основном пробой и перегрев являются основными причинами выхода из строя силового масляного трансформатора, а значит актуальность работы заключается в совершенствовании систем мониторинга и диагностики для своевременного обнаружения предпосылок к пробую и критическому перегреву.

Особенно остро проблема проявляется в системах электроснабжения в часы пик и при температуре окружающей среды более 40 °С, когда система охлаждения не справляется с охлаждением трансформаторного масла.

Важным вопросом является проблема диагностики состояния трансформаторного масла на практике, возможность заранее определить остаточный ресурс изоляции с помощью непрерывного мониторинга температуры и загазованности, позволяющее своевременно принимать решения по обслуживанию и ремонту масляного трансформатора.

Целью работы является определение температурного поля в трансформаторном масле в зависимости от нагрузки, а также исследовать влияние барботажа инертным газом для уменьшения перегрева.

Теоретическая часть. Для оценки нестационарного теплового режима используется уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T ,$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ - коэффициент температуропроводности трансформаторного масла – это основной параметр, характеризующий скорость выравнивания температуры в трансформаторном масле за счёт теплопроводности. Она количественно определяет, насколько быстро тепло или вещество диффундируют через среду;

λ – коэффициент теплопроводности масла;

ρ – плотность;

c_p – удельная теплоёмкость.

Большее значение коэффициента температуропроводности означает более быструю диффузию.

Согласно справочным данным [4], средние значения минерального трансформаторного масла запишем таблицу 1.

Таблица 1. Средние значения для минерального трансформаторного масла

Параметр	при 20°С	при 80°С
Теплопроводность	0.12 – 0.14 Вт/(м·К)	0.11 – 0.13 Вт/(м·К)
Плотность	850–900 кг/м³	800–850 кг/м³
Теплоёмкость	1880–2000 Дж/(кг·К)	2100–2250 Дж/(кг·К)

Лапласиан $\nabla^2 T$ характеризует неоднородность температурного поля и интенсивность теплового потока из зон перегрева в холодные области.

При работе трансформатора происходит нагрев обмоток трансформатора, соответственно лапласиан $\nabla^2 T$ преобразуется в вид:

$$\nabla^2 T = \frac{q_{\text{трансф}}}{\lambda} - \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} ,$$

где $q_{\text{трансф}}$ - тепловая мощность обмоток, λ - теплопроводность масла.

Описание установки. В лабораторной установке использовали трансформатор ОСМ1-0,1 220/5-36 0,1кВА, помещенный внутрь 40 л банки и залитый трансформаторным маслом Т 1500. Над трансформатором подведен Т-образный

барботер, по которому подводится инертный газ, циркулирующий по замкнутому циклу. Основным элементом подачи инертного газа в бак трансформатора является компрессор, обеспечивающий его поступление через соответствующую подводящую линию. В результате в трансформаторном масле формируется поток диспергированных пузырьков инертного газа. Подъем пузырьков вверх обусловлен действием архимедовой силы, при этом в процессе их движения осуществляется перемешивание не равномерно нагретых слоев трансформаторного масла.

По достижении верхней зоны бака газ выводится через коллектор, соединённый с трубопроводом, и направляется в радиаторный блок. Радиатор оснащён вентиляторами, создающими поток воздуха для обеспечения принудительного охлаждения поверхности теплообменных элементов. Это приводит к снижению температуры проходящего через радиатор воздушного потока.

После охлаждения инертный газ возвращается по замкнутому контуру на вход компрессора и вновь подаётся в трансформатор, что обеспечивает непрерывность процесса. Таким образом, вся система функционирует как комбинированный теплоперемешивающий контур, включающий стадию активного теплообмена между горизонтальными неравномерно нагретыми слоями трансформаторного масла, а также стадию отвода тепла через стенки резервуара из-за увеличения поверхности теплообмена.



Рис. 1. Модель установки: 1- бак с трансформатором и трансформаторным маслом, 2 – расширительный бак, 3 – регулируемый компрессор, 4 – термометры электронные, 5 – сопротивления, 6 – радиатор с куллерами, 7 – трубки для циркуляции газа

Результаты экспериментов. На рисунках 2 и 3 представлены графики изменения температуры трансформатора при его работе с различной нагрузкой.

Во всех опытах отмечается монотонный рост температуры во времени, что свидетельствует о накоплении тепла в системе при постоянной работе трансформатора. Однако характер кривых позволяет выделить несколько ключевых особенностей. Наибольший нагрев фиксируется в центральной части трансформатора, что объясняется концентрацией тепловыделяющих элементов. Температура над и под трансформатором также возрастает, но менее интенсивно, что связано с теплообменом с внешней средой в этих зонах.

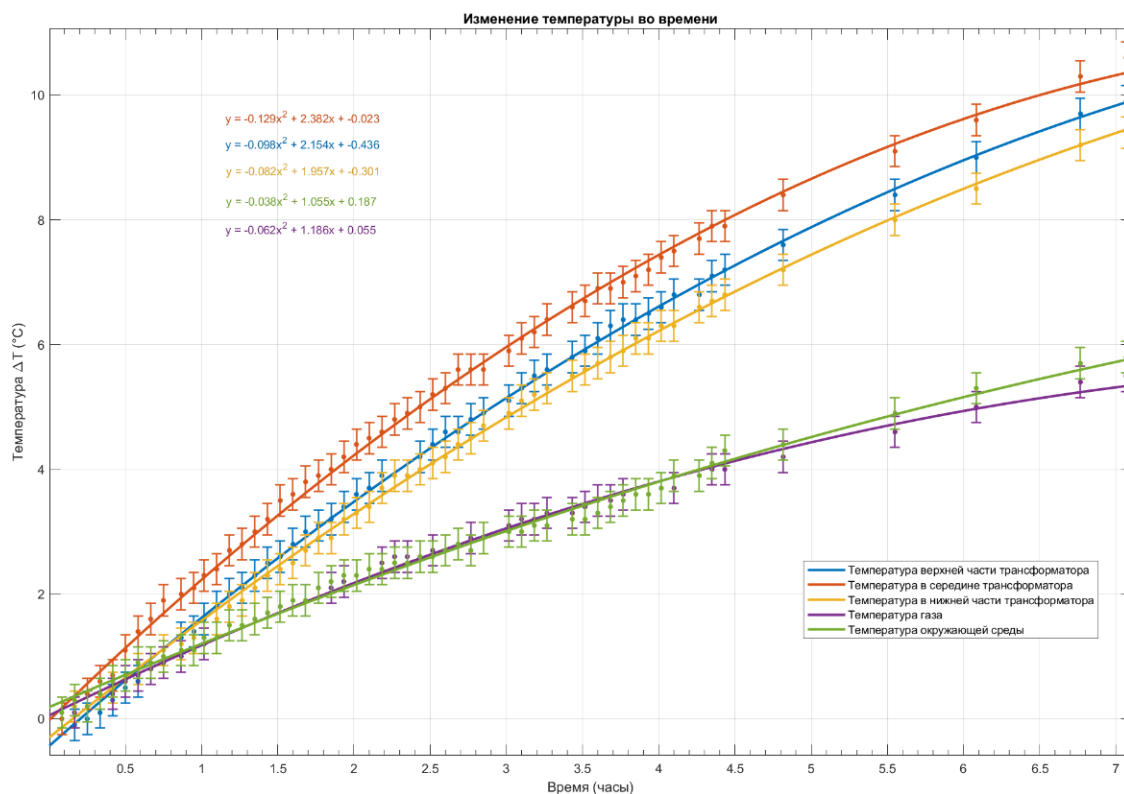


Рис. 2. Графики температурного поля в трансформаторном масле при нагрузке на вторичной обмотке трансформатора 0,15 Ом

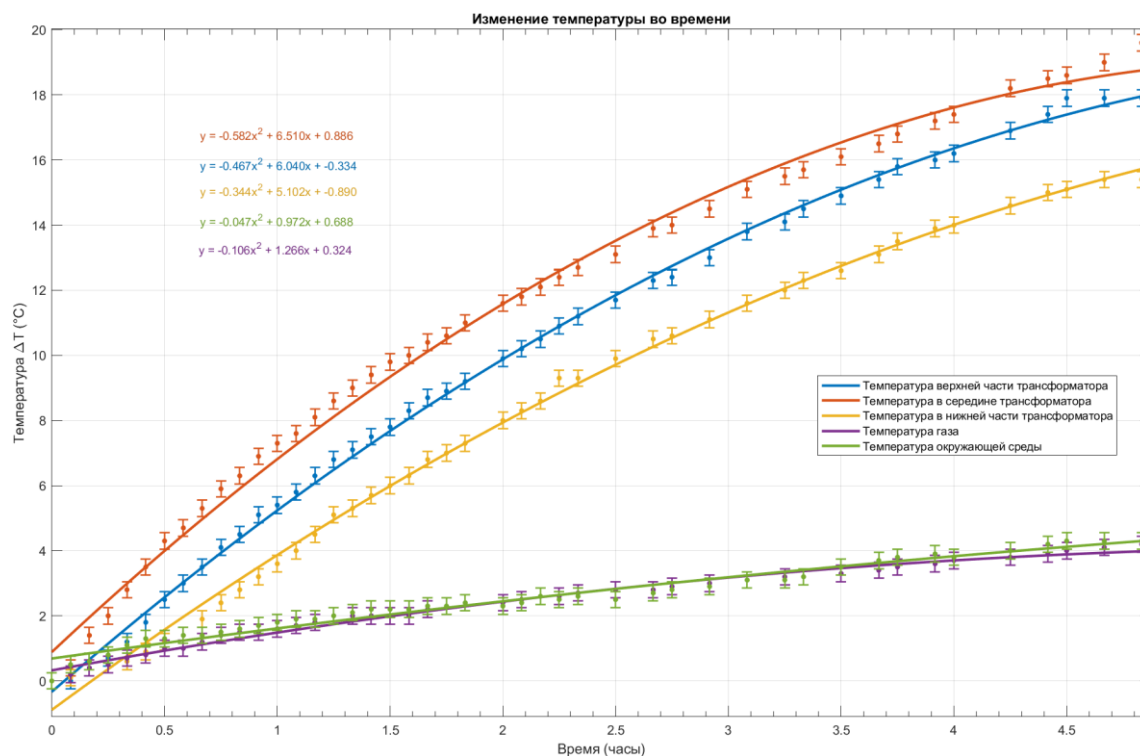


Рис. 3. Графики температурного поля в трансформаторном масле при нагрузке на вторичной обмотке трансформатора 0,5 Ом

Зависимость температуры от нагрузки проявляется в скорости её возрастания: при более высоких нагрузках кривые становятся более крутыми, что связано с увеличением тепловыделения. В отдельных случаях наблюдается стабилизация температуры в верхней части трансформатора, что может быть обусловлено достижением равновесия между выделением тепла и его отводом.

В каждой серии экспериментов проведены по 10 опытов, определены погрешности, построены асимптотические кривые и с помощью программы MatLab подобраны уравнения, (показаны на графиках) по которому изменяется температурное поле.

Результаты экспериментов подтверждают, что новая система охлаждения способна снизить темпы нагрева трансформатора по сравнению с традиционными решениями. Однако её эффективность требует дальнейшей оптимизации, особенно при работе на максимальных нагрузках, когда температура локально возле трансформатора превышает 40 °С. Для надёжной работы трансформатора также важно предотвращать условия, ведущие к парообразованию и термическому разложению масла, используя комплексный мониторинг и современные системы охлаждения. Поэтому для предотвращения перегрева и повышения надёжности системы целесообразно внедрить автоматизированный контроль температуры. Например, использовать реле, срабатывающего при превышении порога в 40 °С, позволит оперативно запускать дополнительные средства охлаждения, такие как компрессор.

На рисунке 4 показаны опыты с всплывающим инертным газом, всплывающий в виде пузырьков диаметра 0.3 – 0.6 мм со скоростью 0,02 м/с. Барботер в установке установлен сразу над трансформатором, на глубине 20 см от поверхности трансформаторного масла.

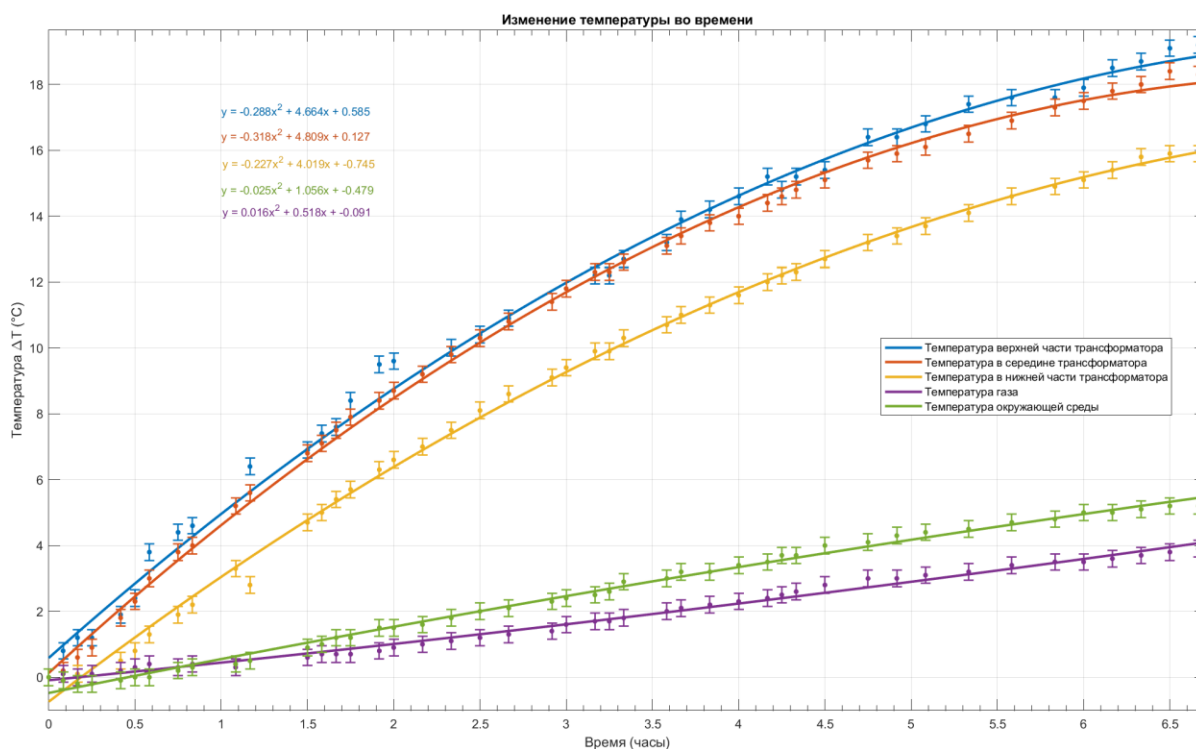


Рис. 4. Графики температурного поля в трансформаторном масле при наличии всплывающих пузырьков и нагрузке трансформатора на 0.5 Ом

Заключение. Сравнив рисунок 4 с рисунками 2 и 3, мы видим, что:

- благодаря барботажу, температурное поле в резервуаре над трансформатором и в средней части трансформатора почти одинаково изменяется, это говорит о том, что несмотря на то, что пузырьки всплывают над трансформатором, они создают конвективные потоки в трансформаторном масле не только там, где всплывает инертный газ, но и ниже, т.е. в масле образуются конвективные потоки, доходящие до средней рабочей области трансформатора, таким образом, происходит локальное охлаждение "горячих точек";

- в момент времени эксперимента 5 ч., локальная температура в верхней и средней рабочей области при барботаже на 1 – 2 °С ниже, чем без барботажа;

- как видно на рис. 2 и 3, тепло распределяется слоями, и чем ниже, тем меньше градиент теплообмена через стенки резервуара, а при барботаже инертным газом увеличивается площадь теплообмена, таким образом, предотвращая перегрев масла;

- вклад в общий теплоотвод при барботаже инертным газом составляет менее 1% по сравнению с конвекцией масла.

Полученные данные могут быть использованы для моделирования термодинамических процессов [5-9] и разработки более совершенных систем охлаждения, обеспечивающих устойчивую работу трансформаторов в широком диапазоне нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фокеев, А. Е. Измерительный комплекс для определения режима работы силовых трансформаторов / А. Е. Фокеев, М. Л. Новоселов // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 33-40.
2. Канюгин, О. И. Стратегия обслуживания силовых трансформаторов в сельских электрических сетях 10кВ по результатам диагностирования/ О. И. Канюгин, Н. Л. Макарова // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 58-67. – EDN WLWSTR.
3. Моделирование стационарного теплового режима масляного трансформатора с примирением ПК ANSYS / В. О. Кропотин, С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов [и др.] // Актуальные вопросы энергетики. – 2021. – Т. 3. – № 1. – С. 37-42.
4. Свойства трансформаторного масла [Электронный ресурс]. – URL: <https://infotables.ru/materialy/52-svoystva-zhidkostej/510-svoystva-transformatornogo-masla-tablitsa> (дата обращения 14.09.2025).
5. Хисматуллин, А. С. Методика технического обслуживания и ремонта промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию / А. С. Хисматуллин, А. Х. Вахитов, А. А. Феоктистов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2-2. – С. 308-313.
6. Усовершенствование методов диагностики масляных трансформаторов / А. И. Исмоилов, Ш. Д. Каримов, Б. Е. Крамарчук, А. С. Хисматуллин // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 4 (118). – С. 123-125.
7. Khismatullin, A. S. Automated software to determine thermal diffusivity of oilgas mixture / Khismatullin A. S. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – P. 052013.
8. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12-24. – EDN TQSVSH.
9. Шарафутдинов, Р. Ф. Исследование температурного поля окрестности перфорированных интервалов в стволе работающей скважины / Р. Ф. Шарафутдинов, Р. А. Валиуллин, А. Ш. Рамазанов [и др.] // Каротажник. – 2025. – № 1 (333). – С. 107-118.

Поступила в редакцию 15.09.2025 г., рекомендована к печати 02.10.2025 г.

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR STUDYING THE TEMPERATURE FIELD IN THE COOLING SYSTEM OF AN OIL TRANSFORMER UNDER VARIOUS LOADS IN THE CIRCUIT

KHismatullin A.S., KHasanov D.D.

In this paper, a study of the temperature field in the transformer oil cooling system under different loads is performed. A created test bench setup designed to study the temperature field is presented. The operating principle of the test bench for determining the contribution made by bubbling to the overall heat exchange process is shown and described. The results of the experiments are presented, showing the mixing of oil caused by bubbling of rising bubbles. During the work, the optimal operating mode of the power oil transformer was determined on the created laboratory model. The study has both scientific and applied significance, since it opens up opportunities for creating new varieties of cooling systems for industrial installations.

Keywords: oil transformer, load, thermal conductivity, bubbling.

Хисматуллин Азат Салаватович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и автоматики промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Уфимский нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.
E-mail: hism5az@mail.ru

KHismatullin Azat Salavatovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Ufa Oil Technological University,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.

Хасанов Динар Дамирович

студент ФГБОУ ВО «Уфимский нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.
E-mail: khasanov.dinar.2004@gmail.com

KHasanov Dinar Damirovich

Student of the Ufa Oil Technological University, Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.

ДВИЖЕНИЕ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ В ЦИКЛЕ НАМИ-2© 2025 *Горожанкин С.А., Киреев А.В.*

Приведен алгоритм численной оптимизации режимов движения гибридного электромобиля в условиях цикла НАМИ-2 по критерию наименьшего удельного расхода топлива, а также наибольшего количества полученной в результате работы ДВС и запасенной в аккумуляторе энергии. Определено, что при прохождении активных участков цикла с коэффициентом нагрузки на ДВС близком к 1, энергии удастся запастись достаточно, чтобы, чередуя зарядку аккумулятора и движение от электродвигателя, выполнить ряд циклов за ее счет. При выборе оптимальной нагрузки на ДВС и аналогичных условиях удастся достичь снижения путевого расхода топлива в 12%.

Ключевые слова: ДВС, удельный расход топлива, гибридный электромобиль, оптимизация, цикл движения НАМИ-2, скажность.

Введение. В настоящее время наиболее перспективными, с точки зрения топливной экономичности, являются гибридные электромобили [1]. В таких автомобилях силовая установка обеспечивает движение как за счет теплового двигателя (обычно это ДВС), так и одного или нескольких электрических, использующих заряд тяговой аккумуляторной батареи, причем, при необходимости, возможна одновременная работа как всех двигателей, так и любого из них.

В процессе движения могут обеспечиваться различные варианты режимов работы гибридной силовой установки (ГСУ) [2]. Так, при движении от ДВС возможна одновременная зарядка аккумулятора. При этом собственно ДВС может работать как в режиме полной нагрузки, так и частичной, его избыточная энергия может быть использована для зарядки аккумуляторной батареи. Это позволяет в дальнейшем обеспечить движение автомобиля только с помощью электродвигателя.

Задачей является определение режимов работы ГСУ таким образом, чтобы обеспечивался минимальный средний путевой расход топлива при движении с совместным и отдельным использованием обоих типов двигателей [3].

Вследствие этого в качестве критерия оптимизации был принят расход топлива на единицу пройденного пути с учетом параметров двигателей ГСУ.

Постановка задачи. Цель работы — установить оптимальные режимы работы силовой установки гибридного электромобиля, позволяющие наиболее эффективно использовать энергию топлива, потребляемого ДВС, при поддержании примерно постоянного уровня зарядки аккумулятора в процессе длительного движения. При этом предполагается, что часть пути автомобиль преодолевает с использованием для движения только электродвигателя.

При проведении исследований рассматривалось движение гибридного электромобиля в ездовом цикле НАМИ-2, который используется для оценки движения электромобилей. Его схема представлена на рис. 1.

Цикл представляет собой последовательность режимов движения, включающих разгон автомобиля с места до скорости 50 км/ч с постоянным ускорением, движение с постоянной скоростью 50 км/ч, затем замедление и остановку. [7]. Он содержит 4 «активных» участка движения, как это представлено в таблице 1.

В данной работе под активным участком подразумевается отрезок пути, на котором при движении происходит передача энергии от какого-либо двигателя к ведущим колесам, либо от колес к генератору или обратимой электромашине. Возможна, также, зарядка аккумулятора при остановке автомобиля (на участке от 53 до 83 секунды).

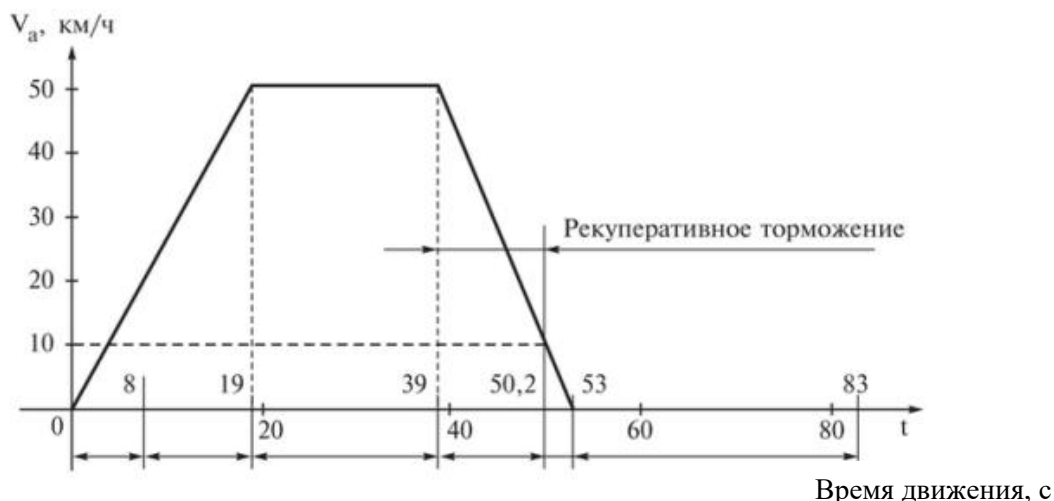


Рис. 1. Схема расчетного цикла движения НАМИ-2

Таблица 1. Активные участки ездового цикла НАМИ-2

№ участка	Интервал времени движения, с	Интервал скорости движения, км/ч (м/с)	Ускорение, м/с ²	Характер движения на участке	Путь передачи энергии к ведущим колесам
1	0...8	0...21,05 (0...5,85)	0,731	Разгон с постоянным ускорением	Движение только от электродвигателя
2	8...19	21,05...50 (5,85...13,9)	0,731	Разгон с постоянным ускорением	Движение от ДВС с зарядкой аккумулятора
3	19...39	50 (13,89)	0	Равномерное движение	Движение от ДВС с зарядкой аккумулятора
4	39...50,2	50...10 (13,89...2,8)	-0,992	Рекуперативное торможение	Движение с зарядкой аккумулятора от генератора

В рассматриваемом ездовом цикле первоначальный разгон автомобиля на участке 1 осуществляется только с помощью тягового электродвигателя до скорости 21 км/ч в течение 8 с. Дальнейший разгон на участке 2 до скорости 50 км/ч, и движение на участке 3 с этой постоянной скоростью осуществляются с использованием ДВС и параллельной работой электрического генератора, заряжающего аккумулятор. На участке торможения 4 осуществляется зарядка аккумулятора с помощью генератора за счет кинетической энергии автомобиля, ДВС при этом отключен от трансмиссии. Для снижения скорости от 10 км/ч до полной остановки применяется штатная тормозная система.

В качестве примера рассматривалось движение микроавтобуса «Соболь» массой 2800 кг, оснащенного бензиновым двигателем номинальной мощностью 72 кВт. Трансмиссия дополнена обратимой синхронной электромашинной номинальной мощностью 46 кВт. Ее мощности достаточно не только разгона автомобиля на участке 1, но и для прохождения всего ездового цикла с использованием только электродвигателя, поскольку максимальная скорость в цикле не превышает 50 км/ч.

Исследования показали, что для обеспечения разгона электромобиля на участках 1 и 2 цикла от электродвигателя его требуемая мощность должна составлять 43.5 кВт. Вычислениями определено, что суммарный расход энергии для прохождения всего цикла составляет 611 кДж (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета движения от электродвигателя за счет энергии аккумулятора

№ участка	Время прохождения участка, с	Мощность, кВт	Коэффициент нагрузки	КПД электродвигателя	Затраченная на участке энергия, кДж	Переданная в акк. энергия, кДж	Затраченная за цикл энергия, кДж
1	8	16,5	0,6	0,898	86,7		611,3
2	11	43,4	1	0,919	385,4		
3	20	11,8	0,273	0,926	277,6		
4	14	0	0	0.91	0	138,5	

Расчет основан на уравнении баланса мощности автомобиля [4], которое для тягового режима от ДВС и электродвигателя на горизонтальном участке дороги приобретает вид

$$N_{ДВС}(V, j, i) = \left(V \left((\psi \cdot m_a g + \frac{c_x \rho}{2} F V^2 + m_a j) \right) \right) / \eta_{тр.ДВС} - N_{эл.дв.} \cdot \eta_{тр.эл.} \quad (1)$$

В приведенном выражении (1):

$N_{ДВС}$ – текущее значение эффективной мощности двигателя внутреннего сгорания;

$N_{эл.дв.}$ – эффективная мощность электродвигателя (на его валу);

$\eta_{тр.ДВС}$ – КПД трансмиссии от ДВС к движителю (задним ведущим колесам);

$\eta_{тр.эл.}$ – КПД трансмиссии от электродвигателя к движителю (колесам автомобиля);

V – скорость движения автомобиля;

j – продольное ускорение автомобиля;

ψ – коэффициент трения качения;

m_a – масса автомобиля;

g – ускорение земного тяготения;

c_x – коэффициент лобового сопротивления автомобиля;

ρ – плотность воздуха;

F – площадь миделевого сечения автомобиля.

Моменты инерции вращающихся элементов трансмиссии и колес сравнительно невелики, их накопленная в процессе разгона кинетическая энергия (около 4%) может быть практически полностью возвращена (с учетом КПД трансмиссии) в процессе замедления.

При переводе электродвигателя в режим электрогенератора, выражение для движения автомобиля по горизонтальному участку дороги возможно упростить [5] и представить как:

$$N_{ДВС}(V, j, i) = \left(V \left((\psi \cdot m_a g + \frac{c_x \rho}{2} F V^2 + m_a j) \right) \right) / \eta_{тр.ДВС} + N_{генер.} / \eta_{тр.генер.},$$

где $N_{генер.}$ – эффективная мощность генератора на его валу;

$\eta_{тр.генер.}$ – КПД трансмиссии генератора.

Результаты, приведенные в таблице 2, позволили учитывать, что для реализации всех участков ездового цикла НАМИ-2 при движении только от электродвигателя необходимые затраты энергии составляют 611 кДж. При достаточной емкости тягового аккумулятора автомобиля становится возможным обеспечить движение в нескольких последовательных циклах за счет накопленной им энергии. Возможное число таких циклов определится только емкостью тягового аккумулятора электромобиля.

Очевидно, что движение с частыми включениями и отключениями ДВС является нерациональным с точки зрения необходимости сохранения его ресурса. Поэтому авторы рассмотрели вариант движения с последовательным выполнением n_1 циклов НАМИ-2 продолжительностью T_u каждый при движении от ДВС и одновременной зарядкой тягового аккумулятора. При достаточной емкости последнего возможно дальнейшее движение в ряде ездовых циклов n_2 такой же длительности с приводом только от электродвигателя, как это представлено на рис.2.

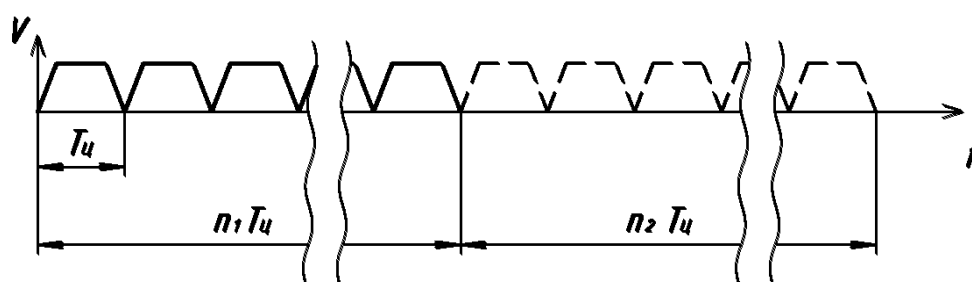


Рис. 2. Выполнение цикла НАМИ-2 с последовательным движением от ДВС (сплошные линии) с зарядкой аккумуляторов и от тягового электродвигателя (пунктирные): $n_1 T_u$ – суммарное время циклов, пройденных с приводом от ДВС и одновременной зарядкой аккумуляторов; $n_2 T_u$ – суммарное время циклов, пройденных с приводом от электродвигателя и отбором электроэнергии из аккумуляторной батареи

Если предусмотреть такое попеременное движение автомобиля от ДВС и электродвигателя, то пройденный путь определится как

$$S_{\Sigma} = n_1 S_{\Pi} + n_2 S_{\Pi},$$

где S_{Π} – протяженность одного ездового цикла (для цикла НАМИ-2 она составляет 509 м).

Для подобного движения с группами циклов предложено ввести понятие «скважности» (по аналогии с представлениями ее в импульсной технике), которая может быть определена по выражению

$$\delta = \frac{n_1 + n_2}{n_1}.$$

На практике число циклов, пройденных с приводом от электродвигателя, может быть определено как

$$n_2 = 0.8 \frac{E_{AKK}}{E_{ЦИКЛ}},$$

где E_{AKK} – энергия, полученная при полном разряде аккумулятора, кДж (емкость аккумулятора);

$E_{ЦИКЛ}$ – энергия, необходимая для прохождения автомобилем цикла с приводом от электродвигателя (в данном случае она составляет 611 кДж).

Коэффициент 0.8 рекомендуется для недопущения полного разряда аккумулятора. Так, например, для аккумулятора емкостью 10 кВт*ч с учетом того, что затрачиваемая энергия в одном цикле составляет 611 кДж (0,17 кВт*ч), число таких циклов составит 47.

Для сопоставления путевого расхода топлива такого гибридного электромобиля при движении в вышеуказанных группах циклов был проведен тяговый расчет для варианта его движения с приводом только от ДВС. Результаты исследований показали, что на участках 2 и 3, этот двигатель (ДВС) работает с относительно небольшой нагрузкой и, соответственно, значительным удельным расходом топлива, что отражено в таблице 3. При этом средний путевой расход топлива составляет 18,43 кг/100 км.

Таблица 3. Параметры работы силовой установки при движении от ДВС

№ участка	Расход топлива на участке, г	Максимальная мощность ДВС на участке, кВт	Коэффициент использования мощности	Удельный расход топлива, г/(кВт*ч)
1	12,229	16,5	0,253	645
2	36,865	43,4	0,609	394
3	44,322	11,8	0,214	674
4	0	0	0	0

В дальнейших исследованиях рассматривались такие режимы движения, при которых на участках 2 и 3 обеспечивается одновременная зарядка аккумуляторной батареи. Это дает возможность перевести ДВС на работу с высокими значениями коэффициента использования мощности, что обеспечивает снижение удельного расхода топлива в соответствии с зависимостью [6]

$$g_e = 423,4 \left(g - g n_{\kappa\omega}' + n_{\kappa\omega}'^2 \right) \left(p + q k_{N_{BCX}} + r k_{N_{BCX}}^2 \right),$$

где 423.4 — эффективный удельный расход топлива на номинальном режиме;

p, q, r — коэффициенты, характерные для данной модели ДВС;

$n_{\kappa\omega}'$ - безразмерная частота вращения коленчатого вала;

$k_{N_{BCX}}$ - коэффициент использования мощности ДВС – отношение текущей мощности к мощности по внешней скоростной характеристике при той же частоте вращения:

$$k_{N_{BCX}} = \frac{N_{ТЯГ}}{N_{BCX}}.$$

Графики внешних и частичных скоростных характеристик ДВС для эффективной мощности и удельного расхода топлива, рассчитанные по [6], приведены на рис. 3. Из них следует, что наименьший удельный расход топлива обеспечивается при коэффициентах использования мощности в интервале (0.6...0.8) N_{BCX} .

В ходе расчетов были учтены КПД электродвигателя, генератора, а также КПД процесса заряда и разряда аккумулятора [6]. Изменение КПД электродвигателя в зависимости от степени его нагрузки k и частоты вращения n в процессе вычислений определялось по эмпирической формуле [4]:

$$\eta_{эл.дв.} = \left[1 + 0.893 \left(\frac{1}{\eta_{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{0.12 \cdot \left(\frac{n \cdot \bar{n}}{n_{ном}} \right)^2 + k^2}{k \left(\frac{n \cdot \bar{n}}{n_{ном}} \right)} \right]^{-1},$$

где $\eta_{ном}$ – КПД электродвигателя на номинальном режиме;
 k – коэффициент его нагрузки по отношению к номинальному режиму;
 $n_{ном}$ – номинальная частота вращения электродвигателя.

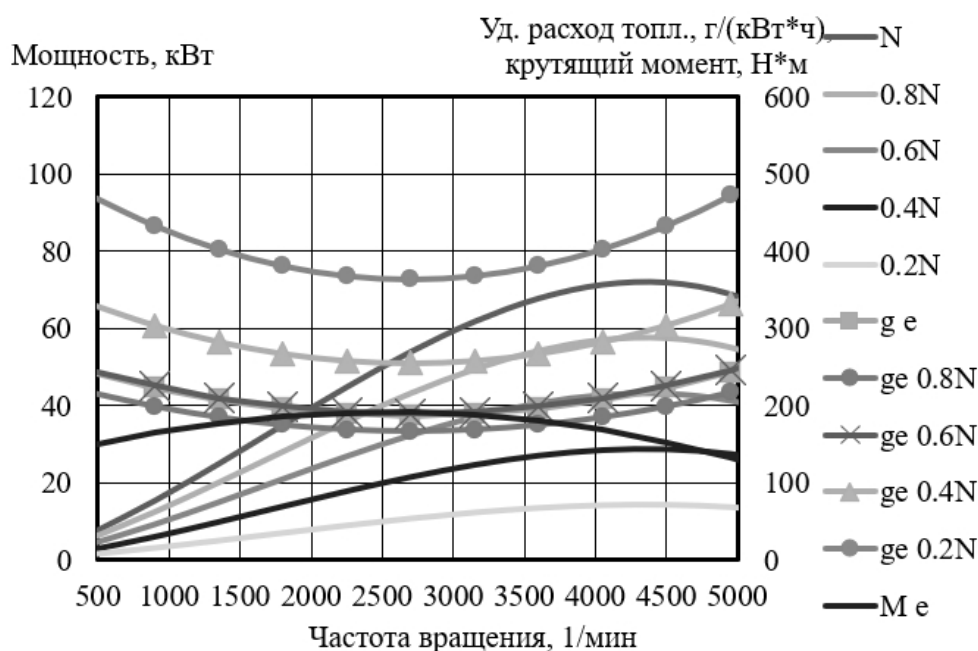


Рис. 3. Внешние и частичные скоростные характеристики двигателя внутреннего сгорания

Графики изменения КПД электрических машин в зависимости от их нагрузки и относительной частоты вращения представлены в [7]. Из них следует, что даже при малых частотах вращения их КПД сравнительно велик и лежит в пределах 0.6...0.9, а в диапазоне относительных частот вращения 0.5...3.0 превышает 0.85 при любых нагрузках вплоть до номинальной.

В ходе исследования в первую очередь был рассмотрен режим прохождения цикла с движением от ДВС с одновременной зарядкой тягового аккумулятора таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная передача энергии в этот аккумулятор. При этом ДВС работает с полной нагрузкой по внешней скоростной характеристике на участках 2 и 3, его коэффициент использования мощности близок к единице. Установлено, что в таком варианте удастся на активных участках цикла (50.2 с) обеспечить передачу в аккумулятор 820 кДж электрической энергии. Соответствующие параметры режимов работы агрегатов силовой установки при таком движении в цикле приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры работы силовой установки при движении с одновременной зарядкой аккумулятора и оптимизации по максимальной аккумулируемой энергии

№ участка	Расход топлива ДВС на участке, г	Тяговая мощность ДВС, кВт	Коэффиц. использования мощности ДВС	Удельный расход топлива ДВС, г/(кВт*ч)	Мощность генератора, кВт	Энергия, полученная из аккумулятора, кДж	Энергия, переданная в аккумулятор, кДж
1	0	-	0	0	0	86,3	-
2	56,18	65.5	0,96	377	25,1	0	175,5
3	109,2	55.3	1	356	43,4	0	592,9
4	0	-	0	0	43,4	0	137,4
Суммарная энергия, переданная в аккумулятор, кДж						819,5	

Анализ представленных результатов оптимизации показал, что при движении на вышеперечисленном режиме удельный расход топлива двигателем внутреннего сгорания ниже, чем при движении в режиме без заряда аккумулятора. При этом суммарный расход топлива в цикле возрастает с 80,9 г до 165 г, т.е. более чем вдвое. Коэффициенты использования мощности ДВС на участках 2 и 3 составляют соответственно 0,96 и 1,00, как это показано в табл.4. Несмотря на увеличение суммарного расхода топлива, становится возможным за счет этой накопленной энергии (820 кДж) обеспечить выполнение еще более чем одного ездового цикла с движением только от электродвигателя, поскольку затраты энергии для него составляют 611 кДж, как было показано ранее. В целом при вышеуказанной емкости тягового аккумулятора (10 кВт*ч) для обеспечения его полной дозарядки требуется выполнить 35 циклов НАМИ-2 с работой ДВС с полной нагрузкой (по внешней скоростной характеристике). Если предусмотреть попеременное движение автомобиля в течении ряда циклов от ДВС, а затем движение от электродвигателя, то «скважность» такого движения составит $\delta = 2,33$.

Путевой расход топлива для такого комплексного осредненного цикла с движением как с использованием ДВС, так и только электродвигателя можно вычислить по зависимости:

$$G_{\text{пут}} = \frac{G_{\text{ДВС}}}{S_{\text{ДВС}} + S_{\text{ЭД}}},$$

где $G_{\text{ДВС}}$ - массовый расход топлива двигателем внутреннего сгорания в результате прохождения цикла с одновременной зарядкой аккумулятора;

$S_{\text{ДВС}}$ - путь, пройденный автомобилем при использовании ДВС;

$S_{\text{ЭД}}$ - путь, проходимый автомобилем при движении только от электродвигателя за счет энергии, накопленной в аккумуляторе.

Вычисления показывают, что в этом случае путевой расход топлива (бензина) составляет 13,94 кг/100 км.

В ходе дальнейших исследований был также рассмотрен вариант режима прохождения цикла с движением от ДВС и одновременной зарядкой аккумулятора, при котором обеспечивается минимальный средний путевой расход топлива при чередовании групп циклов, представленных на рис.2. При этом предусматривалась работа ДВС с частичной нагрузкой на участках 2 и 3. В качестве варьируемых параметров в процессе такой оптимизации являлись коэффициенты нагрузки генератора, которые можно изменять с помощью блока управления силовой установкой.

Определено расчетами, что в таком варианте удастся передать в аккумулятор в течение ездового цикла меньшее количество электрической энергии – лишь 456 кДж. Но, зато при этом удастся обеспечить работу ДВС на наиболее экономичных режимах с коэффициентами использования мощности на участках 2 и 3 цикла соответственно 0,726 и 0,669, как это показано в табл. 5. В этой же таблице приведены режимы работы агрегатов силовой установки при таком движении в цикле.

Суммарный расход топлива за цикл, как это следует из данных табл.5, при этом составляет до 109 г. Исследованиями определено, что для такого варианта величина скважности уменьшается до 1,75, т.е. для обеспечения полной дозарядки тягового аккумулятора потребуется выполнить 63 цикла НАМИ-2 с работой ДВС на режимах с минимальным удельным расходом топлива. Преимуществом такого движения является существенное снижение среднего путевого расхода топлива для группы циклов до 12,26 кг/100 км.

Таблица 5. Параметры работы силовой установки при оптимизации по минимальному путевому расходу топлива

№ участка	Расход топлива ДВС на участке, г	Тяговая мощность ДВС, кВт	Коэффициц. использования мощности ДВС	Удельный расход топлива, г/(кВт*ч)	Мощность, передаваемая генератором, кВт	Энергия, полученная от аккумулятора, кДж	Энергия, переданная в аккумулятор, кДж
2	39,38	51,8	0,726	358	8,3	0	57,6
3	69,16	37,0	0,669	336	25,2	0	347,2
Суммарная энергия, переданная в аккумулятор, кДж							455,9

Исходя из приведенного выше, можно сделать вывод, что для длительного движения гибридного электромобиля в условиях, соответствующих режимам цикла НАМИ-2, наиболее приемлемым является движение с минимальным путевым расходом топлива. Однако, это сопряжено с более частыми, в сравнении с режимом максимальной нагрузки, пусками ДВС, что является негативно влияющим фактором с точки зрения моторесурса двигателя. Поэтому для такого режима необходим аккумулятор относительно высокой емкости, чтобы увеличить абсолютный временной промежуток между пусками. Кроме того, емкость аккумулятора в значительной мере определит продолжительность непрерывной работы автомобиля в закрытых помещениях, а также в зонах предприятий и районах населенных пунктов, где работа автомобильных ДВС не допускается.

Выводы:

1. Установлено, что оптимизация режимов работы ДВС и электрических машин в цикле по минимуму путевого расхода топлива должна предполагать как движение от ДВС с одновременной зарядкой аккумуляторов, так и движение только от электродвигателя на отдельных участках.
2. Предлагаемые режимы движения позволяют обеспечить существенную экономию топлива за счет значительного возрастания коэффициента использования мощности ДВС на участках разгона автомобиля и при движении по участкам с постоянной скоростью с одновременной зарядкой аккумулятора. Расход топлива при таком графике прохождения цикла снижается до 12%.
3. Результаты исследований позволили установить рациональные режимы работы силовой установки для автомобиля ГАЗ «Соболь», дополненного обратимой синхронной электромашиной при его движении в городском цикле НАМИ-2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A review of hybrid renewable energy systems: architectures, battery systems, and optimization techniques / J. C. Leon Gomez, S. E. De Leon Aldaco, A. J. Aguayo // Eng. – 2023. – V. 4. – №. 2. – P. 1446-1467.
2. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles / M. Ehsani [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2021. – V. 109. – №. 6. – P. 967-984.
3. Analysis on emission characteristics of urban buses based on remote online monitoring / Q. Feng [et al.]. – SAE Technical Paper, 2021. – №. 2021-01-0601.
4. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. Объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 287-298.
5. Горожанкин, С. А. Исследование гибридной силовой установки для легких коммерческих автомобилей / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 52-61. – EDN CUVXAK.

6. Горожанкин, С. А. Расчет тяговоскоростных и топливно-экономических свойств автомобилей в современных эксплуатационных условиях: учебное пособие по дисциплине «Теория эксплуатационных свойств» для студентов направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» / С. А. Горожанкин, А. Д. Бумага, Н. В. Савенков. – Донецк: РА ДОН, 2019. – 244 с.
7. Горожанкин, С. А. Энергетическая эффективность режимов разгона автомобиля с гибридной силовой установкой / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков, В. Р. Степакин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 168-177. – DOI: 10.5281/zenodo.14018693. – EDN НКООЕСЕ.

Поступила в редакцию 22.09.2025 г., рекомендована к печати 13.10.2025 г.

THE MOVEMENT OF A HYBRID ELECTRIC VEHICLE IN THE CONDITIONS OF THE NAMI-2 CYCLE

Gorozhankin S.A., Kireev A.V.

An algorithm for numerical optimization of the driving modes of a hybrid electric vehicle in the conditions of the NAMI-2 cycle is presented according to the criterion of the lowest specific fuel consumption, as well as the largest amount of energy obtained as a result of the operation of the internal combustion engine and stored in the battery. It is determined that when passing through the active sections of the cycle with a load factor on the internal combustion engine close to 1, it is possible to store enough energy so that, alternating between charging the battery and moving from the electric motor, a number of cycles can be performed at its expense. When choosing the optimal load on the internal combustion engine and similar conditions, it is possible to achieve a 12% reduction in travel fuel consumption.

Keywords: internal combustion engine, specific fuel consumption, hybrid electric vehicle, optimization, NAMI-2 driving cycle, borehole.

Горожанкин Сергей Андреевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

Gorozhankin Sergei Andreevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Automotive Transport, Service and Operation of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Russian Federation, DPR, Makeevka.

Киреев Алексей Витальевич

аспирант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: a.v.kireev@donnasa.ru

Kireev Aleksei Vitalevich

Postgraduate Student at Department of Automotive Transport, Service and Operation of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Russian Federation, DPR, Makeevka.

УТОЧНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАРИКОВОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ НАСАДКИ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ ГОРЕЛКИ

© 2025 Начкебия Н.С., Бирюков А.Б.

В статье рассматривается проблема расчета регенеративных горелок для нагревательных печей, акцентируется внимание на недостатке доступных инженерных методик для расчета теплообменных насадок регенеративных горелок. Представлена усовершенствованная инженерная методика, основанная на математической модели теплообменных процессов в шариковой регенеративной насадке, верифицированной экспериментально. В известную методику внесено уточнение, связанное с определением величины действующего температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки. Описан алгоритм расчета параметров шариковой насадки регенеративной горелки, базирующийся на исходных данных технологического процесса. Результатом является методика, позволяющая с достаточной точностью проводить предпроектный тепловой расчет теплообменных насадок регенеративных горелок.

Ключевые слова: энергоэффективность, регенеративная горелка, теплообмен, регенеративная насадка, тепловой баланс, методика расчета.

Введение. В условиях развития современной промышленности использование энергоэффективных технологий является неотъемлемой составляющей успешной работы предприятия. Примером такой технологии является применение регенеративных горелок на нагревательных печах. Применение предварительного подогрева воздуха, поступающего на горение, в теплообменнике, являющемся непосредственной составной частью горелки, позволяет экономить до 60% топлива. К сожалению, большинство горелочных устройств с регенеративным подогревом воздуха производятся иностранными компаниями, и в открытом доступе нет достаточных сведений для расчета и проектирования таких горелок.

Существует ряд исследований, посвящённых регенеративным горелкам, они основываются на математическом моделировании процессов работы горелки [1-5]. Однако в настоящее время по-прежнему существует необходимость разработки простой и удобной инженерной методики, позволяющей осуществить подбор насадок регенеративных горелок под нужды каждого технологического процесса.

В работе [6] в «первом приближении» предложена инженерная методика расчета регенеративных горелок, позволяющая основываясь на потребностях производства и особенностях технологического процесса определить рациональные размеры шариковой насадки регенеративной горелки. Дальнейшим логическим продолжением этого исследования была разработка математической модели, позволяющей исследовать теплообменные процессы, происходящие в шариковой регенеративной насадке.

Разработанная авторами данной работы математическая модель для исследования тепловой работы регенеративной насадки детально описана в статье [7]. Подтверждение адекватности математической модели проводилось на лабораторной установке, собранной на кафедре «Техническая теплофизика» ДонНТУ, при помощи физического эксперимента, который показал высокую степень достоверности

разработанной математической модели. Далее на математической модели был проведен ряд опытов для подтверждения инженерной методики [6].

В процессе исследований был уточнен закон изменения температуры продуктов сгорания во времени, уточненная зависимость – логарифмическая:

$$t_{\partial}(\tau) = t_{\partial}^{\min} + (t_{\partial}^{\text{печь}} - t_{\partial}^{\min})^{k_{\partial}} \cdot \ln(\tau),$$

где $t_{\partial}(\tau)$ – температура продуктов сгорания, выходящих из насадки, в произвольный момент времени в течение «дымовой» фазы, °C;

$t_{\partial}^{\min}$ – минимальная температура продуктов сгорания на выходе из насадки в начале «дымовой» фазы, °C;

k_{∂} – параметр, характеризующий изменение температуры продуктов сгорания;

$t_{\partial}^{\text{печь}}$ – температура продуктов сгорания, покидающих печную камеру, °C;

τ – время, с.

Открытым остался вопрос определения значений температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки при решении задачи установления требуемой массы насадки. В работе [6] значения характерных напоров в верхней и нижней частях насадки были заданы интуитивно из возможного с точки зрения физики процесса диапазона значений. Важной задачей является уточнение значения рассматриваемого температурного напора для использования в рамках инженерной методики.

Основная часть. Целью данной работы является уточнение инженерной методики определения основных параметров шариковой теплообменной насадки регенеративной горелки за счет определения величины температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки.

Основным инструментом для решения поставленной задачи является математическая модель теплообменных процессов в насадке регенеративной горелки, описанная в [7].

При помощи математической модели был проведен расчет регенеративных горелок мощностью 100 кВт для шести значений высоты засыпки: 400, 500, 600, 700, 800 и 900 мм. Остальные данные для расчета: длительность одной фазы (время перекидки клапанов) $\tau = 25$ с, температура печи $t_{\partial}^{\text{печь}} = 1250^{\circ}\text{C}$, диаметр шариков $d = 20$ мм, свойства теплоаккумулирующего материала $\rho_m = 2300 \text{ кг/м}^3$, $c_m = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot ^{\circ}\text{C)}$.

Результаты расчётов приведены на рисунке 1.

Температурные напоры $\Delta t_{1,сл}^{н.ф}$, $\Delta t_{1,сл}^{к.ф}$, $\Delta t_{н,сл}^{н.ф}$, $\Delta t_{н,сл}^{к.ф}$ для шариковой насадки регенеративной горелки мощностью 100 кВт, для разной высоты засыпки теплоаккумулирующих шариков в насадке представлены в таблице 1.

Использование этих результатов для обратного расчетов горелок по инженерной методике [6] показало, что рассчитанные значения высоты засыпки ни для одного из случаев не соответствуют исходным значениям, использованным при математическом моделировании.

Для достижения совпадения высоты и других параметров засыпки, полученных при помощи инженерной методики, со значениями, заданными в качестве исходных данных в математическую модель принято решение определять действующее значение температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки по формуле:

$$\Delta t_o = b \cdot \frac{\frac{\Delta t_{1cl}^{н.ф} + \Delta t_{n.cl}^{н.ф}}{2} + \frac{\Delta t_{1cl}^{к.ф} + \Delta t_{n.cl}^{к.ф}}{2}}{2} = b \cdot \Delta \bar{t},$$

где $\Delta t_{1cl}^{н.ф}, \Delta t_{n.cl}^{н.ф}$ – разница температур между продуктами сгорания и насадкой в начале «дымовой» фазы в первом (верхняя часть насадки) и последнем (нижняя часть насадки) условно выделенном слое регенеративной насадки;

$\Delta t_{1cl}^{к.ф}, \Delta t_{n.cl}^{к.ф}$ – разница температур между продуктами сгорания и насадкой в конце «дымовой» фазы в первом (верхняя часть насадки) и последнем (нижняя часть насадки) условно выделенном слое регенеративной насадки;

$\Delta \bar{t}$ – среднеарифметическое значение температурного напора между продуктами сгорания и насадкой.

b – поправочный коэффициент.

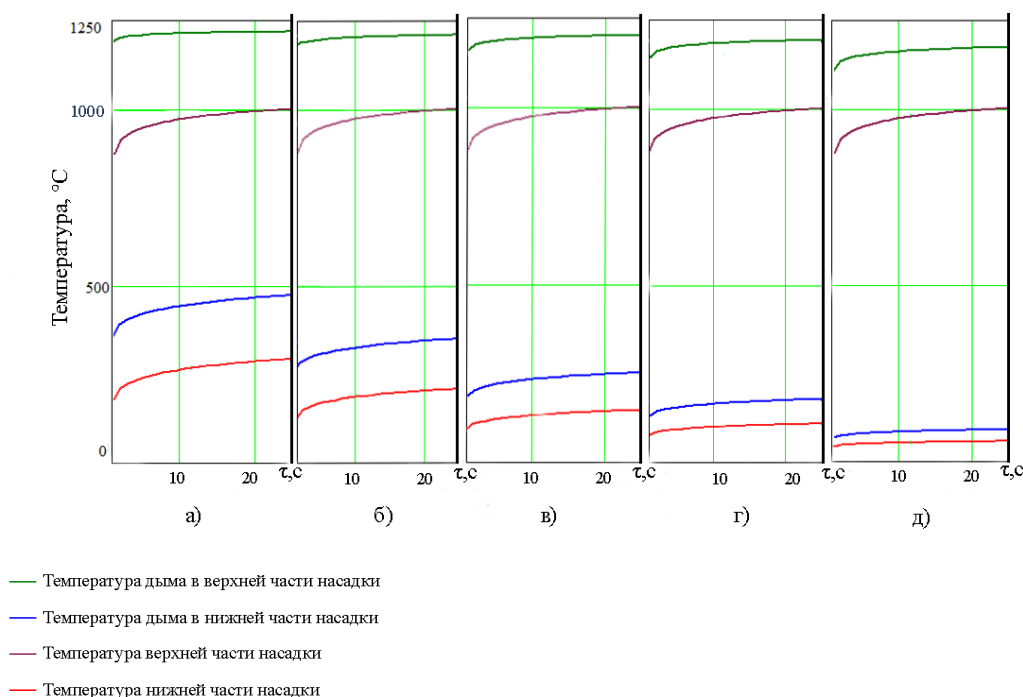


Рис. 1. Изменение температуры для насадки с высотой засыпки а) 0,4 м; б) 0,5 м; в) 0,7 м; г) 0,8 м; д) 0,9 м.

Таблица 1. Данные о температуре насадки и продуктов сгорания в верхней и нижней части насадки

Высота засыпки шариков, мм	Верхняя часть насадки						Нижняя часть насадки					
	Начало фазы			Конец фазы			Начало фазы			Конец фазы		
	$t_{нас}, ^\circ C$	$t_{дым}, ^\circ C$	$\Delta t_{1cl}^{н.ф}, ^\circ C$	$t_{нас}, ^\circ C$	$t_{дым}, ^\circ C$	$\Delta t_{1cl}^{к.ф}, ^\circ C$	$t_{нас}, ^\circ C$	$t_{дым}, ^\circ C$	$\Delta t_{n.cl}^{н.ф}, ^\circ C$	$t_{нас}, ^\circ C$	$t_{дым}, ^\circ C$	$\Delta t_{n.cl}^{к.ф}, ^\circ C$
400	916	1207	291	1000	1219	219	170	475	305	270	480	210
500	916	1196	280	1000	1205	205	130	362	232	208	368	160
600	916	1185	269	1000	1202	202	97	263	166	147	268	121
700	916	1173	257	1000	1193	193	70	187	117	105	191	86
800	916	1156	240	1000	1184	184	57	133	76	68	136	68
900	916	1142	226	1000	1174	174	43	95	52	58	97	39

Для достижения достаточной степени достоверности в методику вводится поправочный коэффициент b позволяющий учесть отклонение действующего значения температурного напора от среднего арифметического напора. Установление значения этого коэффициента проводилось методом начальной подстройки. Для определения значения коэффициента b были произведены расчеты, при помощи математической модели и инженерной методики, для ряда значений толщины засыпки теплоаккумулирующих материалов в насадку, и определены поправочные коэффициенты, позволяющие достигнуть одинаковых результатов (высоты засыпки) при расчете по математической модели и инженерной методике. Анализ полученных результатов позволил выявить квадратичную закономерность изменения коэффициента b (1) в зависимости от среднеарифметического температурного напора насадки ($\Delta \bar{t}$) с высокой достоверностью $R^2=0,97$.

$$b = 0,0002\Delta \bar{t}^2 - 0,045\Delta \bar{t} + 3,657 \quad (1)$$

Результаты определения коэффициента b представлены на рисунке 2.

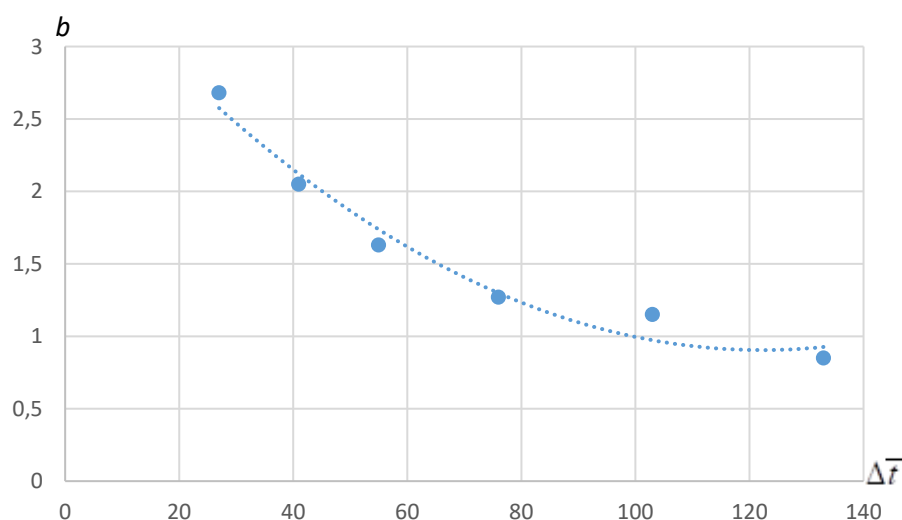


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента b от $\Delta \bar{t}$

При помощи уточненной инженерной методики зная исходные параметры такие как: температура печи, состав топлива, тепловая мощность, которую должна обеспечивать горелка, скорость продуктов сгорания, задав минимальную температуру продуктов сгорания на выходе из насадки - можно определить рациональные параметры шариковой насадки регенеративной горелки.

Согласно методике, сначала проводится расчет горения топлива, в результате которого определяются удельные объемы продуктов сгорания и воздуха (V_o^{yd}, V_e^{yd}). Далее определяются параметры, характеризующий изменение температуры продуктов сгорания и воздуха (k_o, k_e). Определяем среднеинтегральное значение температуры подогретого воздуха $\bar{t}_e$, что позволит определить максимальную температуру подогрева воздуха по формуле:

$$t_{\text{гоз}}^{\text{max}} = \frac{2\bar{t}_e}{1 + \exp(-k_e \cdot \tau)}.$$

Минимальную температуру воздуха определяем по формуле:

$$t_{\text{воз}}^{\min} = t_{\text{воз}}^{\max} \exp(-k_g \cdot \tau).$$

Задаётся скорость движения продуктов сгорания w , которую способно обеспечить предприятие, в соответствии с технологическим процессом, проходящем в агрегате, на который устанавливаются регенеративные горелки.

Рассчитываем α_v , объемный коэффициент конвективной теплоотдачи в шариковой насадке. Определяется по эмпирической формуле Китаева-Фурнаса [8], Вт/(м²·К):

$$\alpha_v = 186 \frac{w_0^{0,9} \left(\frac{t_d^{\text{неч}} + t_d^{\max}}{2} + 273 \right)^{0,3}}{d^{0,75}}, \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)},$$

где w_0 – скорость теплоносителя при НФУ, м/с, м³/с;

d – диаметр теплоаккумулирующего шарика, м;

Определяем необходимую теплообменную поверхность насадки F для обеспечения заданных условий. При этом, согласно тепловому балансу одного цикла работы регенеративной насадки, считаем, что количество теплоты, отданное продуктами сгорания теплоаккумулирующему материалу насадки во время «дымовой» фазы Q_o , равно повышению теплосодержания насадки Q_n и оно же равно количеству теплоты, воспринятому нагреваемым воздухом во время «воздушной» фазы Q_v . Это утверждение справедливо для циклически-стационарного состояния регенеративной насадки.

$$F_n = \frac{Q_n}{\bar{q}},$$

$$\bar{q} = \alpha \cdot \Delta t_o,$$

$$\alpha = \frac{\alpha_v}{\Phi}.$$

Зная удельную поверхность нагрева насадки Φ , переходим к объему насадки и ее массе.

$$V_n = \frac{F_n}{\Phi},$$

$$m_n = V_n (1 - \varphi) \rho_m,$$

где ρ_m – плотность теплоаккумуляционного материала, кг/м³;

φ – порозность укладки шариков в насадке.

Зная объем насадки и скорость движения среды, отнесенную к свободному сечению, определяем площадь сечения насадки F_c , ее диаметр D и высоту H .

Заключение. В статье предлагается инженерная методика для расчета теплообменных насадок регенеративных горелок, усовершенствованная за счет уточнения формул расчета действующего температурного напора между продуктами сгорания и теплоаккумулирующим материалом и закона изменения температуры

продуктов сгорания на выходе из шариковой насадки. Данные уточнения удалось установить при использовании верифицированной математической модели теплообменных процессов шариковой регенеративной насадки. Уточненная инженерная методика позволяет на основе исходных параметров (температура печи, состав топлива, мощность, скорость продуктов сгорания, минимальная температура продуктов сгорания) определять рациональные параметры шариковой насадки регенеративной горелки. Внесённые корректировки позволяют повысить точность расчетов и адаптировать методику к различным производственным условиям. Разработанная методика позволяет осуществлять инженерный расчет необходимых параметров теплообменной насадки для обеспечения нужд процесса, где применяются регенеративные горелки. Применение разработанной методики для определения геометрических параметров и массы шариковой регенеративной насадки в значительной степени облегчит процесс проектирования новых печей и модернизации существующих, с применением современных энергоэффективных регенеративных горелок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, С. К. Исследование тепловой работы регенератора с шариковой насадкой / С. К. Попов // Промышленная энергетика. – 2019. – № 5. – С. 26–33.
2. Монаркин, Н. Н. Построение и исследование простейшей математической модели регенеративного теплообменника / Н. Н. Монаркин, А. А. Сеницын, А. Н. Наимов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 3 (72). – С. 11–15.
3. Кабаков, З. К. Математическое описание тепловых процессов в насадке регенеративной горелки / З. К. Кабаков, И. А. Сенатова // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии. I Международная научно-техническая конференция. – 2013. – С. 119–123.
4. Сысоева, Т. Е. Конечно-разностное решение задачи нагрева (охлаждения) неподвижного пористого слоя материала на основе уточненной физической модели движения газа / Т. Е. Сысоева, Ю. Я. Абраменков; Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – 2008. – С. 272–286.
5. Соболев, Е. В. Математическая модель регенеративного теплоутилизатора / Е. В. Соболев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2010. – № 2. – С. 34–44.
6. Бирюков, А. Б. Методика определения основных параметров теплообменной насадки регенеративных горелок / А. Б. Бирюков // Сталь – 2018. – № 11. – С. 72–75.
7. Начкебия, Н. С. Моделирование температурного поля насадок регенеративных горелок / Н. С. Начкебия, А. Б. Бирюков, Я. Ю. Асламова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 234–241. – DOI 10.5281/zenodo.14717871. – EDN CCQUTX.
8. Глинков, М. А. Основы общей теории тепловой работы печей / М. А. Глинков. – М.: Металургиздат, 1959. – 416 с.

Поступила в редакцию 24.09.2025 г., рекомендована к печати 16.10.2025 г.

REFINEMENT OF THE ENGINEERING METHODOLOGY FOR DETERMINING THE MAIN PARAMETERS OF THE BALL HEAT EXCHANGER NOZZLE OF A REGENERATIVE BURNER

Nachkebiia N.S., Biriukov A.B.

The article addresses the issue of calculating regenerative burners for heating furnaces, focusing on the lack of available engineering methods for calculating heat exchange nozzles of regenerative burners. An improved engineering method is presented, based on a mathematical model of heat exchange processes in a ball regenerative nozzle, verified experimentally. The well-known method has been refined to determine the effective temperature difference between combustion products and nozzle material. The calculation algorithm for parameters of the ball nozzle of a regenerative burner is described, based on initial data of the technological process. The result is a method that allows for sufficient accuracy in pre-project thermal calculation of heat exchange nozzles of regenerative burners.

Keywords: energy efficiency, regenerative burner, heat exchange, heat balance, regenerative nozzle, calculation method.

Начкебия Наталья Сергеевна

аспирант кафедры технической теплофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк,
E-mail: moon-ananaska@yandex.ru

Nachkebiia Natalia Sergeevna

Postgraduate Student at Department of Technical
Thermophysics of Donetsk National Technical
University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технической теплофизики,
проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
Department of Technical Thermophysics, Vice-rector
of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ВЛИЯНИЕ ШУМА ОТ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ И ОБСЛУЖИВАНИЮ ТРАНСПОРТА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ЧЕЛОВЕКА

© 2025 *Кравченко М.В., Толкачёв О.В.*

В работе проведена оценка шумового загрязнения от предприятий по ремонту и обслуживанию автотранспорта на окружающую среду и человека, проведена характеристика источников шума на примере комплекса предприятий по ремонту и обслуживанию транспорта, который располагается в непосредственной близости к жилому массиву, проведён расчет уровня шумового загрязнения от источников шума, а также предложены мероприятия по снижению уровня шума.

Ключевые слова: промышленный шум, предприятия по обслуживанию и ремонту автотранспорта, шумовое загрязнение окружающей среды, расчет уровня шума.

Введение. Шумовое загрязнение становится одной из наиболее значимых экологических проблем современного общества, особенно в районах с интенсивным использованием транспортных средств, в том числе с наличием предприятий, занимающихся ремонтом и обслуживанием автотранспорта. С увеличением числа автомобилей на улицах городов возрастает и уровень шума, создаваемого не только движением транспортных средств, но и деятельностью специализированных сервисов.

Длительное воздействие на человека высоких уровней шума может вызывать различные заболевания, включая нарушения слуха, стресс, сердечно-сосудистые заболевания и даже психические расстройства. Кроме того, шум негативно сказывается на экологии, нарушая естественные звуковые ландшафты, негативно влияет на животных, что выражается в изменении их поведения, потере среды обитания, нарушении коммуникации и даже физиологических изменений [1].

Для снижения неблагоприятных последствий воздействия шума необходимо выявление источников шума, определение соответствия его уровней нормативным значениям и разработка мер по снижению уровней шума для наиболее проблемных участков.

Основная часть. Оценка шумового загрязнения в работе проведена на примере комплекса предприятий по ремонту и обслуживанию транспорта, который располагается в непосредственной близости к жилой зоне (Северный жилой массив в Ворошиловском районе г. Ростова-на-Дону). В комплекс предприятий, обслуживающих легковой и грузовой транспорт, входят: зоны технического обслуживания (ТО) и ремонта автотранспорта (ТР), шиномонтажа и автомойки.

С целью оценки воздействия шума на окружающую среду и человека уточнены источники шума и их характеристики. На предприятии выявлено 42 источника шума. Оборудование эксплуатируется в дневное время суток. Все источники шума условно можно отнести к следующим группам:

- технологическое оборудование, в котором основными источниками шума являются электродвигатели: аппараты полуавтоматической сварки, резки по металлу, гайковерты и ударные инструменты, угловые шлифовальные машины, шлифовальный,

токарный, абразивно-отрезной станки Технологическое оборудование является источником непостоянного шума. Оборудование располагается в закрытых одноэтажных зданиях, в границах промышленной площадки.

- инженерное оборудование: промышленные вентиляторы, компрессоры участков покраски и автомоек. Источниками шума являются электродвигатели. Оборудование располагается на стенах снаружи зданий. Инженерное оборудование является источником постоянного шума, шумовой характеристикой которого является уровень звуковой мощности, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц.

- автотранспорт, который является источником непостоянного шума. В расчете использовались среднестатистические данные по количеству проезжающего автотранспорта на открытых парковочных участках, а также в зонах проезда автотранспорта.

Расчет шумовых характеристик проведен в соответствии с методиками [2–4].

Результаты расчета уровней звуковой мощности источников предприятий ТО и ТР автотранспорта представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета уровней звуковой мощности, дБ

Источники	Октавные полосы частот, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Электродвигатель вентилятора АИР 56 В4	57,6	59,3	60,9	62,3	62,9	60,2	56,4	52,6
Компрессор автомойки FIAC – 4 шт.	60,8	63,7	66,6	69	70,6	68,9	66	60,6
Электродвигатель вентилятора ВКК-250 – 7 шт.	48,6	50,3	53,3	53,9	53,9	51,2	47,4	43,6
Сварочный аппарат – 4 шт.	64,2	64,3	62,2	58	54,3	48,9	43,2	37,2
Ударные работы – 3 шт.	100,8	103,7	106,6	109	110,6	108,9	106	100,6
Гайковерт HAZET – 3 шт.	93,6	96,5	99,4	101,8	103,4	101,7	98,8	93,4
Компрессор автомойки Fubag VCF/100 – 2 шт.	82,8	85,7	88,6	91	92,6	90,9	88	82,6
Автотранспорт (Парковка 1)	62,1	61,2	54,7	49,2	44,9	40,6	35,8	31,5
Автотранспорт (Парковка 2)	56,72	55,82	49,32	43,82	39,52	35,22	30,42	26,12
Проезд автотранспорта 1	63,8	62,9	56,4	50,9	46,6	42,3	37,5	33,2
Автотранспорт (Парковка 3)	60,5	59,6	53,1	47,6	43,3	39	34,2	29,9
Автотранспорт (Парковка 4)	57,49	56,59	50,09	44,59	40,29	35,99	31,19	26,89
Проезд автотранспорта 2	62,26	61,36	54,86	49,36	45,06	40,76	35,96	31,66
Проезд автотранспорта 3	56,37	55,47	48,97	43,47	39,17	34,87	30,07	25,77
Пост резки металла – 2 шт.	56,4	66,5	74	79,4	82,6	83,8	83,6	81,5
Ручная УШМ-900/125э – 2 шт.	81,8	84,7	87,6	90	91,6	89,9	87	81,6
Компрессор KB-7 – 3 шт.	70,8	73,7	76,6	79	80,6	78,9	76	70,6
Токарный станок – 2шт.	79	86	90	92	90	85	80	74
Абразивно-отрезной станок	79,2	79,3	77,2	73	69,3	63,9	58,2	52,2
Шлифовальный станок	81	82	85	86	87	82	81	79

Расчет спектра шума от источников технологического и инженерного оборудования, включающий восемь октавных уровней звуковой мощности L_P (дБ) проводился по формуле:

$$L_P = L_{PA} + K \Delta L_A,$$

где: L_{PA} – скорректированный уровень звуковой мощности, дБ; $K \Delta L_A$ – спектральные поправки, дБ.

Эквивалентный уровень звука, создаваемый потоком автотранспорта на территории предприятия, рассчитывается по формуле:

$$L_{AЭKB} = 10 \times \lg(Q) + 13,3 \times \lg(V) + 4 \times \lg(1 + \rho) + \Delta L_{A1} + \Delta L_{A2} + 15, \text{ дБ}$$

где: Q – интенсивность движения, ед./час; V – средняя скорость потока автомобилей, км/час; ρ – доля средств грузового транспорта в потоке, %; ΔL_{A1} – поправка, учитывающая вид покрытия проезжей части улицы или дороги, дБА; ΔL_{A2} – поправка, учитывающая продольный уклон улицы или дороги, дБА.

Точки (РТ) для расчета уровней звуковой мощности от источников предприятий ТО и ТР автотранспорта, выбраны на основе анализа расположения промышленных объектов и близлежащих жилых зданий. Ситуационная карта-схема размещения исследуемых промышленных объектов представлена на рисунке 1.

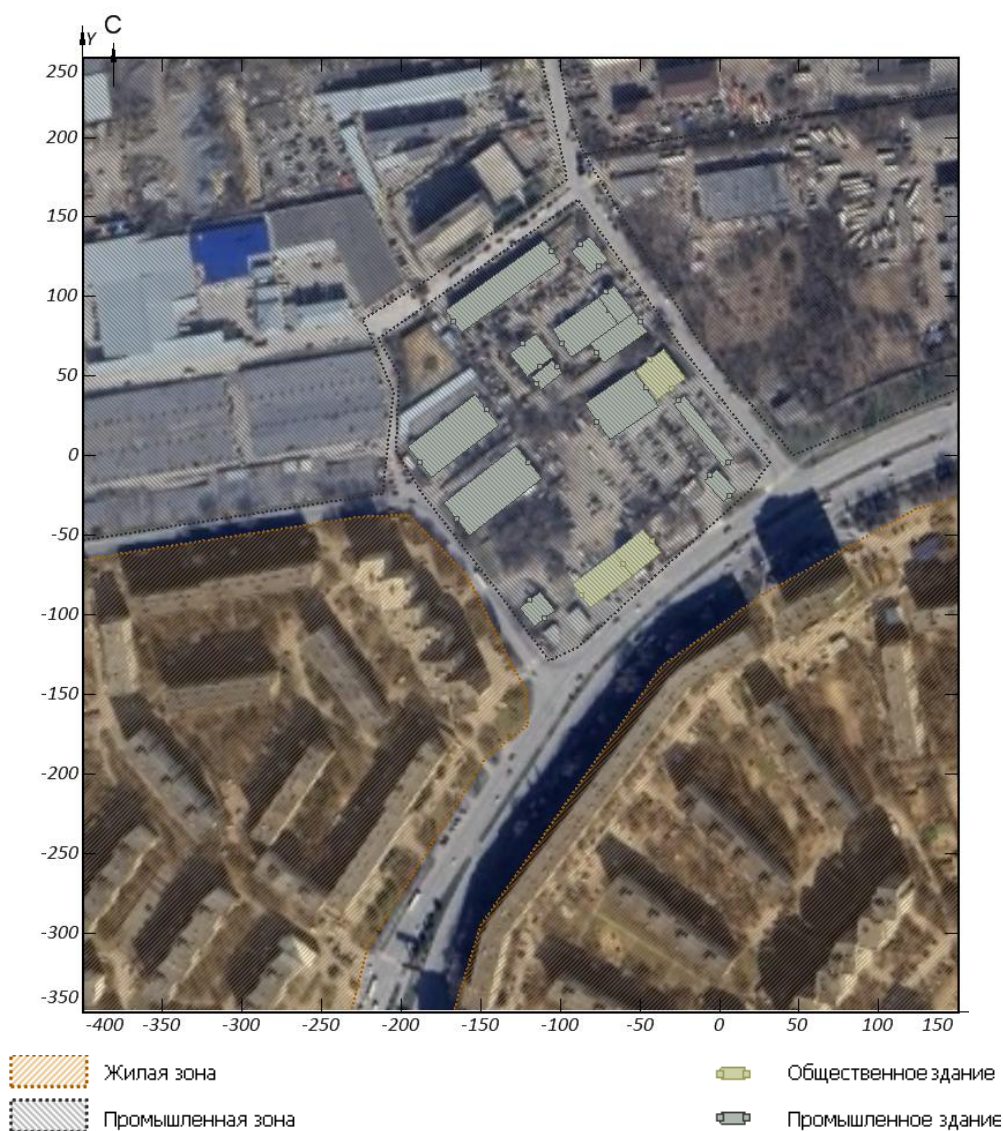


Рис. 1. Ситуационная карта-схема размещения исследуемых промышленных объектов

Ближайшим жилым объектом является жилой дом на расстоянии 44 метров с запада от промышленной площадки, также на территории промышленных объектов располагается здание общественной библиотеки и объекты общественного питания.

Расчет октавных уровней звукового давления, дБ, и уровней звука, дБА, создаваемых источниками шума предприятий по ремонту и обслуживанию автотранспорта, в расчетных точках произведен с помощью программного комплекса «ЭКОцентр - Шум», версия 1.1.0, разработанного ООО «ЭКОцентр» г. Воронеж.

Расчет ожидаемых уровней звукового давления и уровней звука в расчетных точках выполняется отдельно для каждого источника шума.

Результаты расчетов уровней акустического воздействия в расчетных точках (РТ), а также максимальное значение по расчетным точкам (РТ_{макс}) от источников шума приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов уровней акустического воздействия от источников шума

РТ	Уровень звукового давления, дБ									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	La, дБА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
РТ 1	51,1	50,8	53	55,2	57,2	58,3	55,8	49,9	33,6	62,1
РТ 2	50,5	49,9	51,4	53	54,9	56	53,6	48	32,3	59,8
РТ 3	49,9	46,1	45,3	40,8	39,2	40,2	37,6	31,8	15,1	44,3
РТ 4	53,1	52,5	54,8	57,2	59,3	60,5	58,1	52,8	38,2	64,4
РТ 5	56,3	55,4	57,1	59	61	62,4	60,3	56	45,3	66,4
РТ _{макс}	72,35	72,93	75,82	78,89	81,56	83,12	81,12	78,25	72,13	87,5
ПДУ	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55

По результатам, приведённым в таблице 2, можно сделать вывод о превышении значений предельно допустимых уровней шума на следующих частотах: 125, 250, 500, 1000, 2000, 8000 Гц, а также превышение максимального уровня звука La, дБА. Соответственно необходимы меры по снижению уровней звукового давления.

Источниками шума, которые вносят основной вклад в шумовое загрязнение окружающей среды, является технологическое и инженерное оборудование. Соответственно мероприятия по борьбе с шумом должны быть направлены именно на эти источники шума, особое внимание необходимо уделить источникам постоянного шума.

Анализ полученных октавных уровней звукового давления, дБ в расчетных точках показывает, что уровни акустического воздействия превышают ПДУ на территории жилой зоны. Поэтому необходимо разработать и реализовать мероприятия для уменьшения уровня акустического воздействия звука, дБА, создаваемого источниками шума.

Для снижения шумового загрязнения окружающей среды от источников шума предприятий по техническому ремонту и обслуживанию автотранспорта рекомендуется:

- установить защитные экраны для следующих участков: сварочный пост, участок резки металла, токарный, абразивно-отрезной, шлифовальный станок;
- установить шумозащитные кожухи для источников постоянного шума, а именно для компрессоров автомойки, промышленных вентиляторов;
- установка шумопоглощающих покрытий в помещении цеха;
- звукоизоляция дверей, ворот и окон производственных помещений в которых выполняются ударные работы;
- регулярное обслуживание станков для уменьшения шума из-за износа, использование смазочных и охлаждающих жидкостей;
- установка шумоизолирующих панелей для зон технического ремонта и обслуживания автотранспорта.

Карты с изображением изолиний общего уровня звука, создаваемые источниками шума промышленной площадки предприятий по ремонту и обслуживанию транспорта, приведены на рисунке 2.

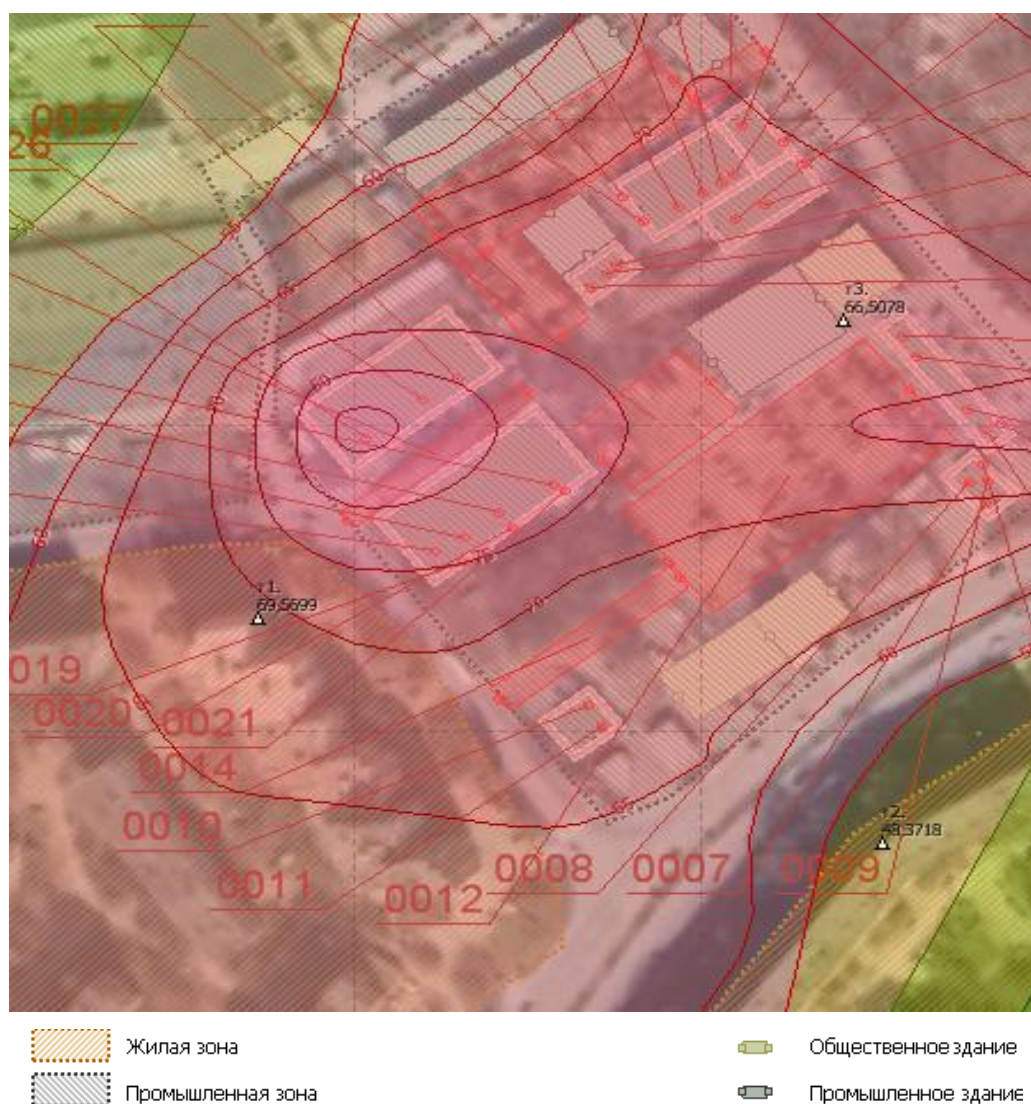


Рис. 2. Карта-схема изолиний общего уровня звука от всех источников шума, дБ. Используются следующие обозначения уровней звукового давления, дБ:

40 – 45	50 – 55	60 – 65	80 – 85
40 – 45	50 – 55	65 – 70	85 – 90
45 – 50	55 – 60	70 – 75	
45 – 50	55 – 60	75 – 80	
50 – 55	55 – 60	75 – 80	

Выводы. Проведена оценка шумового загрязнения от предприятий по ремонту и обслуживанию автотранспорта на окружающую среду и человека, характеристика источников шума комплекса предприятий по ремонту и обслуживанию транспорта, показала что к источникам шума относится технологическое, инженерное оборудование и транспорт, всего источников шума – 42, наибольшие значения по непостоянному шуму создаются от ударных работ от 100,6 до 110, 6 дБ; наибольшие значения по постоянному шуму – от 82,6 до 92,6 дБ (от компрессоров автомойки Fubag VCF/100).

Результаты расчетов уровней акустического воздействия в расчетных точках показали, что значения превышают предельно допустимые от 9,82 дБ на частоте 120 Гц, до 34,12 на частоте 2000 Гц. Предложены мероприятия по борьбе с шумовым загрязнением окружающей среды для технологических участков предприятий по ремонту и обслуживанию транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yavuz, A. Vehicle noise pollution awareness for human health and environmental impacts: a comprehensive review / A. Yavuz, A. N. Hazer- Yavuz, S. E. Hasibektasoglu // ACTA Pharmaceutica Scienc. – V. 62 (2). – 2024. – P. 224-245. – DOI: <https://doi.org/10.23893/1307-2080.APS6216>.
2. Пособие к МГСН 2.04-97. Проектирование защиты от транспортного шума и вибраций жилых и общественных зданий: разработано Научно-исследовательским институтом строительной физики (НИИСФ) Российской академии архитектуры и строительных наук (докт. техн. наук Осипов Г.Л., канд. техн. наук Климухин А.А.) и Московским научно-исследовательским и проектным институтом типологии, экспериментального проектирования (МНИИТЭП): утверждено указанием Москомархитектуры от 24.08.99 №35. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005931> (дата обращения: 22.03.2025).
3. Осипов, Л. Г. Звукоизоляция и звукопоглощение: учебное пособие/ Л. Г. Осипов, В. Н. Бобылёв, Л. А. Борисов. – Москва: АСТ. Астрель. – 2004. – 451 с. – ISBN 5-17-026286-8.
4. Каталог шумовых характеристик технологического оборудования: рекомендован к изданию секцией N 6 "Защита от шума" Научно-технического совета НИИСФ. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044401> (дата обращения: 25.03.2025).

Поступила в редакцию 14.07.2025 г., рекомендована к печати 14.08.2025 г.

IMPACT OF NOISE FROM TRANSPORT REPAIR AND MAINTENANCE ENTERPRISES ON THE ENVIRONMENT AND HUMANS

Kravchenko M.V., Tolkachev O.V.

The paper assesses noise pollution from motor vehicle repair and maintenance enterprises on the environment and humans, characterizes noise sources using the example of a complex of motor vehicle repair and maintenance enterprises located in close proximity to a residential area, calculates the level of noise pollution from noise sources, and proposes measures to reduce noise levels.

Keywords: industrial noise, motor vehicle repair and maintenance enterprises, noise pollution of the environment, noise level calculation.

Кравченко Михаил Валентинович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры техносферной безопасности «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: m.v.kravchenko@donnasa.ru

Kravchenko Mikhail Valentinovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Technosphere Safety of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Russian Federation, DPR, Makeevka.

Толкачёв Олег Владимирович

магистрант кафедры техносферной безопасности «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: ovtolkachov@gmail.com

Tolkachev Oleg Vladimirovich

Master student at Department of Technosphere Safety of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Russian Federation, DPR, Makeevka.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВОДОРОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

© 2025 Сердюк А.И., Белецкий Я.О.

В связи с ростом спроса на водородное топливо необходимо наращивать темпы его получения. В работе рассмотрен метод получения водорода из твердых коммунальных отходов. Для начала из отходов получают газ метан, далее из него после очистки получают водород. При получении водорода таким методом необходимо проводить его очистку от примесей при помощи холодной воды.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, метан, водород, очистка, переработка.

Введение. Полигоны по захоронению твердых коммунальных отходов (ТКО) представлены двумя основными видами – курганным (насыпные) и котлованным (на базе отработанных карьеров). В течение длительного времени они непрерывно заполняются твердыми коммунальными отходами и представляют собой биотермические реакторы, в которых в результате анаэробных процессов дигерирования образуется метаносодержащий газ – так называемый «свалочный» биогаз с содержанием метана 35–65 %. В настоящее время широкое распространение получили методы высокотемпературного и пиролизического сжигания твердых отходов с последующим захоронением образующейся золы на специальном полигоне. При этом продукты сгорания содержат опасные соединения диоксинов и фуранов.

Существует метод анаэробного сбраживания (или метановое брожение), при использовании которого получается газ, содержащий метана (CH_4) около 70% от общего объема [1]. Анаэробное сбраживание — это естественный биологический процесс разложения органических веществ (пищевые отходы, растительность, навоз и т.д.) без доступа кислорода. В результате этого процесса деятельность сообщества микроорганизмов производит биогаз, основными компонентами которого являются:

- метан (CH_4) — 50-75% (горючий компонент, источник энергии);
- диоксид углерода (CO_2) — 25-50%;
- незначительные примеси: сероводород (H_2S), азот, водород, пары воды.

Полученный биогаз можно использовать непосредственно как топливо или очистить до качества природного газа (биометан) и закачать в газовые сети.

Сырье для получения метана: подходит не весь мусор, а только его органическая фракция, т.е. лучшее сырьё - пищевые отходы (очистки, испорченные продукты, отходы от кухонь и ресторанов); садовые отходы (трава, листья, ветки); сельскохозяйственные отходы (навоз, птичий помет, солома); осадки сточных вод (ил с очистных сооружений).

Технологическая цепочка получения метана. Процесс происходит на специализированных предприятиях — биогазовых станциях или метантенках на мусорных полигонах процесс происходит в несколько этапов.

Этап 1. Сбор и подготовка отходов. Отходы собираются и транспортируются на станцию, проходя тщательную сортировку для удаления неорганических материалов. Органическая масса измельчается и гомогенизируется для лучшего и равномерного брожения. Часто разные виды отходов смешивают для оптимального соотношения питательных элементов.

Этап 2. Анаэробное сбраживание. Подготовленная масса помещается в герметичный реактор — метантенк. Это огромный резервуар, где поддерживаются оптимальные условия для жизни бактерий. Отсутствие кислорода (анаэробная среда). Постоянная температура (обычно 35-38°C мезофильный режим или 55-60°C термофильный режим). Подогрев часто осуществляется самим биогазом. Постоянное перемешивание для равномерного прогрева и предотвращения образования корки. Процесс сбраживания длится от нескольких дней до нескольких недель.

Этап 3. Сбор и очистка биогаза. Биогаз, выделяющийся в реакторе, собирается в газгольдерах (обычно это купол над метантенком). Далее он проходит очистку и осушивание (удаление паров воды).

Этап 4. Утилизация продуктов процесса. На выходе получается два полезных продукта:

- биогаз/биометан: используется для производства электроэнергии и тепла (на когенерационных установках). Топлива для автомобилей (после очистки до биометана). Подачи в газовые сети.

- дигестат (перебродившая масса) это ценное органическое удобрение, богатое питательными веществами. Его обеззараживают и используют в сельском хозяйстве.

Получение метана на полигонах ТКО. Даже если отходы просто захораниваются на полигонах, органическая фракция всё равно разлагается анаэробно, выделяя так называемый свалочный газ, который на 40-60% состоит из метана и CO₂. Этот газ не только теряется в атмосфере (что значительно усиливает парниковый эффект), но и создает риск взрывов и пожаров. \

Существует технология утилизации свалочного газа. В теле свалки бурятся вертикальные скважины. Скважины объединяются системой трубопроводов. С помощью вакуумных насосов газ откачивается из толщ отходов. Далее газ очищается и используется так же, как и биогаз из реакторов [2].

Отбор биогаза осуществляли через специально пробуренные скважины (5, 10, 15 м глубиной) в разных частях карты полигона. Образование биогаза в теле полигона ТКО происходит по типу твердофазной ферментации с четкой биогеохимической зональностью по уровням.

Первый уровень (10 см — 1,0 м) отличается наиболее интенсивными аэробными процессами и нарастанием микробной биомассы, содержащей ассоциации мезофильных аэробных и факультативных анаэробных микроорганизмов. Он характеризуется первичным разложением, гидролизом белковых соединений и накоплением первичных продуктов их разложения.

На втором уровне (1,0—5,0 м) происходит накопление органических кислот (масляной, пропионовой, молочной, уксусной), а также низших спиртов, аммиака, нитратов, нитритов и водорода.

Третий уровень (5,0—10,0 м) отличается процессами анаэробной ферментации с участием нескольких видов микроорганизмов, в том числе лактобацилл и клостридий. Температура третьего уровня варьирует от 30 до 50 °С, что создает благоприятные условия для развития термофильных микроорганизмов, ускорения процессов разложения сложных органических веществ и интенсификации метанового брожения.

Четвертый уровень (10,0—15,0 м) температура этого уровня медленно снижается до 20 °С, что свидетельствует об истощении легкоразлагаемых органических соединений. Уменьшается и количество генерируемого метана.

Изменение состава биогаза в зависимости от глубины скважины представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав биогаза в зависимости от глубины скважины

Глубина скважин, м	Количественный состав биогаза, %			
	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂
5	63,4	22,8	11,2	2,6
10	59,1	34,3	5,6	1,0
15	44,1	23,7	26,0	6,2

После получения метана (CH₄) из твердых коммунальных отходов необходимо очистить газ от CO₂, так как наличие углекислого газа в смеси а дальнейшем резко уменьшает скорость получения водорода. Для этого используем технологию «водной мойки» этот метод является разновидностью абсорбции (Water Scrubbing) [3-4].

Ключевой принцип заключается в разной растворимости метана и углекислого газа в воде. Углекислый газ (CO₂) хорошо растворяется в воде. Его растворимость повышается при двух условиях: низкая температура - чем холоднее вода, тем больше CO₂ может в ней раствориться; высокое давление - чем выше давление, тем лучше происходит процесс абсорбции. Метан (CH₄) растворяется в воде гораздо хуже (примерно в 25-30 раз меньше, чем CO₂, при одинаковых условиях). Таким образом, когда газовая смесь под давлением контактирует с холодной водой, CO₂ активно переходит (абсорбируется) в водный поток, а метан (основной компонент биометана) проходит через воду значительно очищенный [5].

Упрощенная схема установки для очистки выглядит следующим образом:

- компрессия (сжатие). Исходный биогаз (содержащий ~55-65% CH₄ и ~35-45% CO₂) компрессором подается в колонну абсорбции под давлением 6-12 бар;

- абсорбция (поглощение CO₂). Сжатый газ подается снизу в абсорбер (высокая колонна, заполненная насадками для увеличения площади контакта). Навстречу ему сверху подается холодная вода (часто охлажденная до 5-10 °C). Газ и вода интенсивно контактируют, а CO₂ растворяется в воде. Метан, плохо растворимый, поднимается вверх колонны.

- выход очищенного газа. Из верхней части абсорбера выходит очищенный метан (биометан) с концентрацией CH₄ 95-99%. Его можно направлять на дальнейшую сушку и использование (в газовую сеть, в качестве топлива для транспорта и т.д.). Для очистки 1000 Нм³/ч биогаза с 40% CO₂ до биометана (98% CH₄) при давлении 10 бар и температуре 8°C потребуется воды ~100 м³/ч (100 л на 1 Нм³ биогаза). Это позволит получить ~600 Нм³/ч биометана и уловить ~400 Нм³/ч технического CO₂.

- регенерация воды. Вода, которая теперь насыщена растворенным CO₂ (так называемая "насыщенная" или "богатая" вода), отводится из нижней части абсорбера. Эту воду нельзя просто выбросить, ее необходимо регенерировать (очистить), чтобы использовать снова. Это ключевой этап для экономии ресурсов. Регенерация происходит в десорбере (колонне, работающей при атмосферном давлении или даже под вакуумом). При сбросе давления растворенный CO₂ выделяется из воды пузырьками (это похоже на открытие газированной воды). Иногда для полной регенерации воду дополнительно подогревают или продувают воздухом;

- охлаждение и возврат. Регенерированная ("бедная") вода охлаждается в теплообменнике и возвращается на вход в абсорбер. Цикл повторяется.

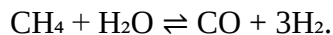
После этой процедуры получаем чистый метан, теперь можем получить из него водород, получение которого происходит паровой конверсией.

Паровая конверсия метана — это высокотемпературный каталитический процесс взаимодействия метана (CH₄) с водяным паром (H₂O), в результате которого образуется синтез-газ (смесь угарного газа CO и водорода H₂).

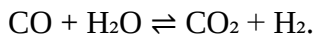
Этот синтез-газ затем подвергается дополнительной стадии — конверсии монооксида углерода, где CO реагирует с паром, давая дополнительный водород и CO₂.

Это двухстадийный процесс:

- паровая конверсия метана:



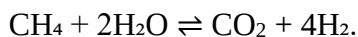
- реакция конверсии CO (сдвиговая реакция):



Паровая конверсия метана (Primary Reforming).

Химическая реакция 1 высокоэнтальпийная имеет энтальпию +206 кДж/моль. Условия проведения температура 800 - 900 °С. Высокая температура необходима для достижения высокой степени конверсии метана и скорости реакции. Давление 2.0 - 3.5 МПа (20-35 атм). Несмотря на то, что реакция идет с увеличением объема (1+1 моль → 1+3 моль) и низкое давление было бы выгоднее, процесс ведут при повышенном давлении для повышения скорости процесса.

Важный нюанс, помимо основной реакции происходит реакция гетерогенного водяного газа (уравнение 2) с энтальпией -41 кДж/моль. Суммарное уравнение реакции выглядит следующим образом:



После получения водорода в газовой смеси находится еще и диоксид углерода, который опять необходимо удалить при помощи холодной воды, так как растворимость водорода (H₂) в 50-70 раз ниже, чем у CO₂, следовательно, получим более чистый продукт на выходе.

Таким образом, для типового синтез-газа с содержанием CO₂ около 25% можно ориентироваться на расход ~10-12 литров холодной воды под давлением ~25 бар для очистки 1 м³ газовой смеси. Технология схожа с очисткой биогаза от углекислого газа при получении метана из твердых коммунальных отходов [6-7].

Следовательно, получение метана из ТКО — это реальная, эффективная и экологически ответственная технология, которая является ключевым элементом экономики замкнутого цикла. Она превращает проблему отходов в ценный ресурс — получение водорода, внося вклад в энергетическую независимость и защиту окружающей среды. Очистка биогаза от CO₂ с помощью холодной воды — это эффективный, проверенный и безопасный метод, идеально подходящий для средних и крупных биогазовых установок. Хотя процесс требует значительных энергозатрат на сжатие и охлаждение, его надежность и относительно низкие эксплуатационные расходы делают его одним из самых популярных в мире методов для получения высококачественного биометана. Получение водорода из метана методом паровой конверсии (ПКМ) является основным промышленным способом производства водорода в мире. Очистка смеси H₂/CO₂ холодной водой под давлением — это надежный, безопасный и проверенный временем физический метод. Он идеально подходит для предварительной или основной очистки газовых потоков с высоким содержанием CO₂ и высоким давлением.

Заключение. Таким образом, если использовать технологическую цепочку отходы-метан-водород, то можно сократить негативное влияние от полигонов твердых коммунальных отходов, а также обеспечивать электротранспорт значительным количеством водородного топлива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Снижение эмиссии метана на полигонах твердых коммунальных отходов / И. Н. Лыков, А. А. Логинов, Н. И. Вольхина, Е. А. Тарасова // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 4. – С. 36-40. – DOI 10.24411/1728-323X-2018-14036. – EDN YNKQQH.
2. Иванова, И. В. Перспективные исследования анаэробной переработки растительной биомассы в топливо / И. В. Иванова, В. Е. Тюляков // Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ 2019 года: Сборник статей по материалам конференции, Санкт-Петербург, 27 января – 06 февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2020. – С. 206-215. – EDN DVPUVD.
3. Патент № 2778321 С1 Российская Федерация, МПК В09В 3/10, В09В 3/40, В09В 3/65. Способ и устройство для получения биогаза из массива бытовых отходов : № 2021128450 : заявл. 29.09.2021 : опубл. 17.08.2022 / В. С. Ежов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет». – EDN QCXVWQ.
4. Использование метаногенерирующих установок на базе твердых коммунальных отходов в малоэтажном строительстве / К. В. Афонин, Т. С. Жилина, А. А. Загорская, М. Н. Павлова // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 73-81. – DOI 10.15593/2224-9826/2022.1.06. – EDN LYOPLX.
5. Садчиков, А. В. Оптимизация условий жизнедеятельности метанообразующего консорциума полигонов ТКО / А. В. Садчиков // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 2. – С. 222. – EDN YLKKYZ.
6. Моделирование установки парового риформинга метана с выделением водорода: учебно-методическое пособие / А. Г. Х. Алфаяд, Д. З. Валиев, Р. А. Кемалов, А. Ф. Кемалов. – Казань: Казанский федеральный университет, 2023. – 59 с.
7. Ягодковский, В. Д. Адсорбция: учебное пособие / В. Д. Ягодковский. – Москва: Лаборатория знаний, 2024. – 217 с. — ISBN 978-5-93208-675-9.

Поступила в редакцию 15.09.2025 г., рекомендована к печати 09.10.2025 г.

USING MUNICIPAL SOLID WASTE TO PRODUCE HYDROGEN FOR ELECTRIC VEHICLES

Serdiuk A.I., Beletskii I.A.O.

Due to the growing demand for hydrogen fuel, it is necessary to increase the rate of its production. This paper discusses a method for producing hydrogen from solid municipal waste. The process begins with the production of methane gas from the waste, which is then purified to produce hydrogen. When producing hydrogen using this method, it is necessary to purify it from impurities using cold water.

Keywords: solid municipal waste, methane, hydrogen, cleaning, processing.

Сердюк Александр Иванович

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: ecoalserdiuk@rambler.ru

Serdiuk Aleksandr Ivanovich

Doctor of Chemical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Technosphere Safety of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Russian Federation, DPR, Makeevka.

Белецкий Ярослав Олегович

ассистент кафедры техносферной безопасности «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка.
E-mail: ya.o.beletskiy@donnasa.ru

Beletskii Iaroslav Olegovich

Assistant at Department of Technosphere Safety of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture – branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Russian Federation, DPR, Makeevka.

60-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ФИЗИКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ, МЕТРОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ ИМЕНИ ИВАНА ЛУКИЧА ПОВХА

Кафедра физической гидродинамики (такое название ранее имела кафедра «Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии», а с ноября 2013 года стала называться кафедрой «Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии имени И.Л. Повха») создана в августе 1965 года. Первым ее заведующим был Повх Иван Лукич, член-корреспондент АН УССР, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники Украины.

Формирование кафедры было тесно связано с развитием хозяйственных научно-исследовательских работ, которые впервые появились в университете на кафедре физической гидродинамики и были надежным источником для обеспечения всего учебного и научного процесса. Методология преподавания была трансформирована в сторону исследовательской модели, где ядром учебного процесса стали актуальные научные результаты сотрудников кафедры, интегрированные непосредственно в образовательные курсы.



д-р техн. наук, профессор

Повх Иван Лукич

(11 ноября 1909 - 15 февраля 1997)

Научно-педагогическая карьера Ивана Лукича Повха была тесно связана с Донбассом. Получив образование и учёные звания в Ленинградском политехническом институте, он в 1961 г. возвращается в регион для работы в ведущих научных учреждениях: Институте горного дела АН УССР и ДонНИИЧерМете. Важным этапом стало совмещение с сентября 1962 г. научной и педагогической работы в Донецком педагогическом институте, где он занял должность профессора.

Инициативы И. Л. Повха привели к формированию уникальной для своего времени интегрированной структуры – учебно-научно-производственного объединения. В его состав вошли профильная кафедра физической гидродинамики, СКТБ «Турбулентность» и проблемная лаборатория, что позволило консолидировать усилия примерно 400 исследователей, инженеров и студентов вокруг актуальных задач физики турбулентности и гидродинамики.

В 1965 – 1967 годах в состав преподавательского коллектива кафедры входили: д.т.н., проф. Повх И. Л., к.т.н., доц. Иодко Э. А. и пятеро молодых и амбициозных преподавателей: Болонов Н. И., Ступин А.Б., Завгородний П. Ф., Атанов Г. А., Торяник А. И. Все они, в течение последующих 15-20 лет, стали докторами наук и профессорами.



Преподаватели кафедры 1966 г.

Болонов Николай Иванович начал свою трудовую деятельность в ДонГУ в 1966 г. в должности ассистента кафедры физической гидродинамики. Н. И. Болонов читал лекции и проводил практические занятия по курсам «Магнитная гидродинамика» и «Теория пограничного слоя». Новый электромагнитный метод исследования турбулентности был темой его кандидатской диссертации. На основе этого метода были получены важные научные результаты по изучению турбулентности (стратифицированных течений, которые составили основу его докторской диссертации (1987 г.) Н. И. Болонов был первым директором СКТБ «Турбулентность».

Ступин Александр Борисович, заведующий кафедрой (1987 – 2013 гг.), начал свою работу на кафедре в сентябре 1967 г. после окончания физико-механического факультета ЛПИ, он организовывал новую лабораторию и разработал курс лекций по теории турбулентности. Ступин А.Б. успешно руководил большим научным коллективом, который работал над проблемой снижения гидродинамического сопротивления. Этой проблеме посвящены его кандидатская и докторская диссертации (1985 г.). За цикл научных работ, связанных с решением проблемы снижения гидродинамического сопротивления и внедрением результатов исследований в области холодильной техники, А. Б. Ступин получил диплом лауреата Государственной премии по науке и технике.

Завгородний Петр Федорович пришел на кафедру из заводского КБ. После защиты докторской диссертации (1986 г.) он переезжает в г. Ровно, где работал заведующим кафедрой и проректором по научной работе технического ВУЗа.

Атанов Геннадий Алексеевич работал на кафедре с 1966 года после окончания Харьковского авиационного института. Читая курс газовой динамики, он исследует влияние сжимаемости при движении воды, создает лабораторию и потом, защитив кандидатскую и докторскую диссертации (1978 г.), сформировал свое научное направление, которое получило широкое признание.

Торяник Александр Иванович читал курс физики жидкости, поставил лабораторный практикум. Его докторская диссертация (1987 г.) посвящена влиянию молекулярной структуры жидкости на гидродинамическое сопротивление.

Позже, в разные годы в преподавательский коллектив влились - д.т.н., проф. Кавун Ю. М., к.т.н. Быковская Н. В., к.т.н. Бескровная М. В., Удовиченко А. Ф., Моцак Т.А., Уткина Л. А. и выпускники кафедры – д.т.н., проф. Недопекин Ф. В., д.т.н., проф. Белоусов В. В., к.ф.-м.н., доц. Фиошин Н. В., к.т.н. Корнев А. Л., к.ф.-м.н., с.н.с. Асланов П. В., д.т.н., с.н.с. Симоненко А. П., к.т.н. Сухарева С. Ф., к.т.н. Бескровная М. В., к.т.н., доц. Пометун Е. Д., старшие преподаватели - Собко А. Ю., Фоменко С. А., Оверко В.С., Бондаренко В. И., Бодряга В. В., Несова А. В., заведующие лабораториями - Костенко К. В., Лебедев В. Н., Бодня А. С., Лаппа О. П., Березина Е. А., Фоменко И. Ю., Попова А. Е. и др. Повх И. Л. возглавлял коллектив кафедры по декабрь 1987 года. Заменил Ивана Лукича профессор, доктор технических наук, проректор по научной работе, академик Украинской экологической академии наук и Академии наук высшей школы Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины, Лауреат государственной премии по науке и технике Александр Борисович Ступин. С 2013 года кафедру возглавляли выпускники кафедры: доктор технических наук, профессор, Лауреат государственной премии по науке и технике Белоусов Вячеслав Владимирович (2013-2020 г.г.), доктор технических наук, профессор, Лауреат государственной премии по науке и технике Недопёкин Федор Викторович (2020 г.), кандидат физико-математических наук, доцент Асланов Петр Васильевич (2020-2025 г.г.). В настоящее время кафедру возглавляет выпускница кафедры, кандидат технических наук, доцент Пометун Екатерина Дмитриевна.



Преподаватели кафедры 2009 г.

В 1974 г. при кафедре организовалась проблемная лаборатория «Физических методов исследования турбулентности», а в 1980 г. – специальное конструкторско-технологическое бюро «Турбулентность». В 1997-2014 г. кафедра являлась базовой для общеуниверситетских кафедры ЮНЕСКО «Экология техногенного региона» и Ассоциированного Центра ЮНЕСКО по микронаучному эксперименту.

О масштабе и значимости научных исследований, которые проводились на кафедре, можно судить по таким данным. Так, в 1985-1991 годах над проблемой работали 360 чел., среди них - 5 докторов и 26 кандидатов наук. Объем выполняемых НИР составлял близко 2,6 млн. руб., 90% работ выполнялось по решениям директивных органов.

Широкое международное признание имеют полученные в университете решения проблем снижения гидродинамического сопротивления в турбулентных потоках (д.т.н. Ступин А.Б., д.ф.-м.н. Торяник А.И., к.ф.-м.н. Финошин Н.В., д.т.н. Симоненко В.П., к.ф.-м.н. Асланов П.В., к.т.н. Корнев А.Л., к.т.н. Ларин С.Л., к.т.н. Быковская Н.В., д.х.н. Сердюк А.И., д.т.н. Погребняк В.Г., к.ф.-м.н. Макагон Б.П., к.т.н. Наумчук Н.В., д.т.н. Никулин В.А., к.э.н. Самуйлов В.О.); турбулентного обмена в стратифицированных и многофазных течениях (д.т.н. Болонов Н.И., к.т.н. Лобачев В.Г., к.т.н. Барыбин А.И., Шкредов В.М., Лесниченко А.Н., Лебедев В.Н.); проблем импульсных и волновых процессов в гидродинамике (д.т.н. Атанов Г.А., д.т.н. Семко А.Н., к.т.н. Украинский Ю.Д.); проблем гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических технологиях (к.т.н. Иодко Э.А., д.т.н. Завгородний П.Ф., к.т.н. Севостьянов Г.М., д.т.н. Недопекин Ф.В., д.т.н. Белоусов В.В., к.т.н. Гридин С.В., к.т.н. Редько Г.А., к.т.н. Мелихов В.М.); разработка первичных преобразователей, информационно-измерительных и управляющих систем для изучения турбулентных потоков (д.т.н. Горожанкин С.А., к.т.н. Украинский Ю.Д., к.т.н. Силенко Е.М., к.т.н. Чеплюков В.Г., к.т.н. Савостенко П.И., к.т.н. Романчук С.М., к.т.н. Дунаевский И.Г., к.т.н. Тищенко А.Д., к.т.н. Корнев В.Д., к.т.н. Пометун Е.Д., Фесивский Г.Д., Надтока А.Н., Славный А.Г.).

На базе кафедры физической гидродинамики, проблемной лаборатории и СКТБ «Турбулентность» было создано учебно-научно-производственное объединение «Турбулентность». В созданном структурном подразделении проводились работы по различным научным направлениям:

1) разработка методов измерения турбулентных характеристик потоков (термоанемометрических, магнитных, ультразвуковых, лазерных), конечной целью которых явилось создание автоматизированного измерительного комплекса «Турбулентность». Один из таких комплексов с успехом работал на Арктических научно-исследовательских дрейфующих станциях «СП-26» и «СП-30».

2) разработка и исследование методов снижения гидродинамического сопротивления жидкостей с помощью добавок полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ), имеющих важное народно-хозяйственное значение. Метод снижения сопротивления добавками ПАВ был успешно апробирован и внедрен на холодильной установке шахты им. газеты «Социалистический Донбасс».

3) исследования по повышению химической однородности затвердевающих расплавов за счет управления гидродинамикой жидкого ядра. Результаты этих исследований являлись важными для металлургической промышленности Донбасса.

4) исследование турбулентных стратифицированных течений. Эти работы позволяли понять сущность турбулентных процессов, происходящих в Мировом океане.

5) исследование импульсных и волновых процессов в гидродинамике, которые также имели важное прикладное значение.

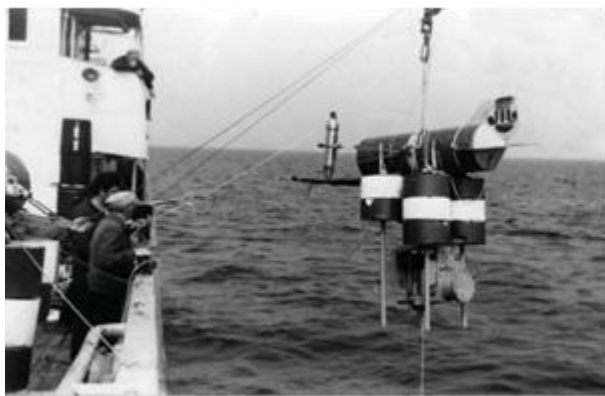
6) исследование гидродинамических и тепломассообменных процессов в металлургии методами математического моделирования.

Большинство научных исследований имело двойное назначение: народно-хозяйственное и оборонное. Для нужд Военно-морского флота Советского Союза были разработаны и исследованы гидродинамически-активные полимерные композиции для увеличения скоростей движения (форсаж) атомных подводных лодок и торпед, разработана и изготовлена аппаратура для измерения турбулентных характеристик в гидродинамических следах кораблей с целью определения их местонахождения. Указанные разработки получили высокую оценку главных разработчиков военно-морской техники для ВМФ.

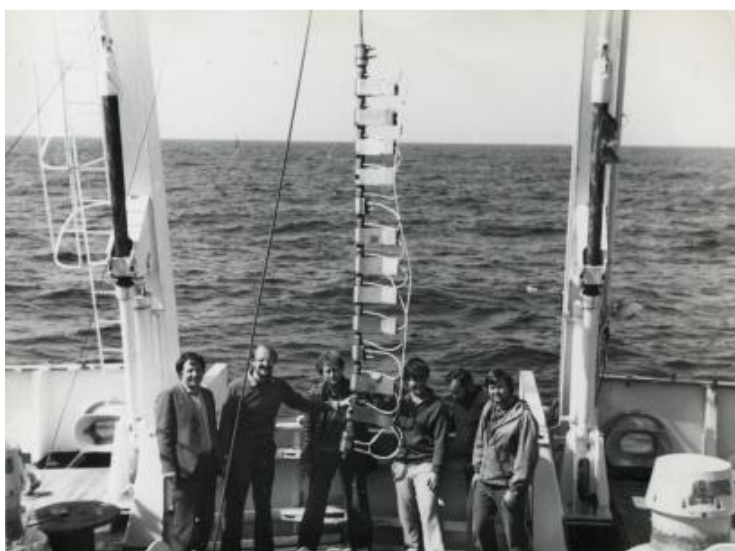
Коллектив ученых решал актуальные задачи современной науки. Его научные разработки включали большой объем работ по проектированию и изготовлению научных приборов. Много вузов и НИИ страны оснащались термоанемометрами и измерительными комплексами, выпущенными СКТБ. «Турбулентность» Такие комплексы успешно работали на станции «Северный Полюс» и различных гидрографических экспедициях в Тихом и атлантическом океанах.



Кишкань Р.В. с зондом на станции «Северный полюс – 30»



Черное море 1987 г. Макет всплывающей гидрографической станции



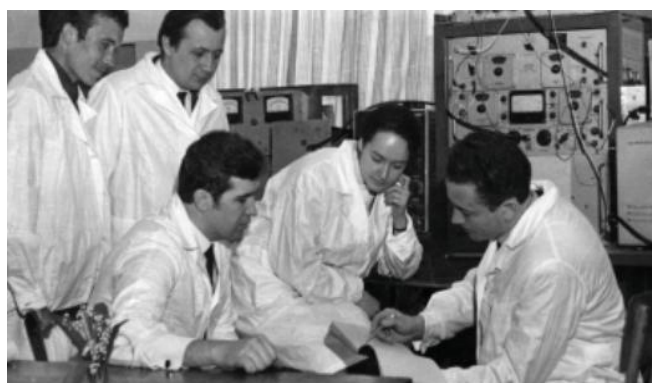
Гирлянда гидрографических датчиков. Тихий океан, район Камчатки 1983 г.

И. Л. Повх придавал огромное значение научным контактам ученых различных школ, много сил и внимания уделял организации и проведению научных форумов. По инициативе И.Л. Повха в Донбассе проведены Всесоюзная конференция по проблемам

турбулентности (1977 г.), Всесоюзное совещание по использованию достижений аэрогидродинамики в технологических процессах (1978 г.), Всесоюзный семинар по снижению турбулентного трения добавками (1978 г.) и III-я Всесоюзная конференция по проблемам турбулентных течений (1986 г.).



Руководство Всесоюзной научной конференции «Проблемы турбулентных течений» (1977 г., П. Мелекино). В центре председатель оргкомитета академик Струминский В.В. кафедрой



Сотрудники научно-исследовательских лабораторий кафедры (газовой динамики, теплофизики, физики жидкости, гидродинамики)

В 1992-2000 годах кафедра существенным образом расширила профиль подготовки специалистов (бакалавров, специалистов и магистров) по трем направлениям подготовки: «Физика неравновесных процессов» (в настоящее время «Техническая физика»); Метрология и измерительная техника (в настоящее время «Стандартизация и метрология»); Компьютерный эколого-экономический мониторинг (в настоящее время «Техносферная безопасность»). За 60 лет существования кафедры защитили дипломы по трем специальностям свыше 1500 бакалавров, специалистов и магистров.



Профессор, доктор технических наук
Ступин Александр Борисович
(5 марта 1942 - 5 мая 2013)

С 1987 г. по май 2013 г. заведующим кафедрой был доктор технических наук, проректор по научной работе, академик Украинской экологической академии наук и Академии наук высшей школы Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины, Лауреат Государственной премии по науке и технике Александр Борисович Ступин. Основными научными направлениями, которыми занимался Александр Борисович были исследования по снижению гидродинамического сопротивления в турбулентных потоках, разработка гидродинамически активных полимерных композиций, исследования по экологии и техногенно-экологической безопасности. Ступин А.Б. является основателем новых направлений на кафедре – «Компьютерный эколого-экономический мониторинг», «Метрология и информационно-измерительные технологии». Под его руководством кафедра получила название «Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии». Он автор более

250 научных трудов, из них 8 монографий, имел 26 авторских свидетельств и патентов на полезные модели, подготовил 12 кандидатов наук. В 2009 г. Ступин А.Б. организовал Международный научный семинар «Повховские научные чтения». По настоящее время данный семинар продолжает свою работу.

С 2013 г. по июнь 2020 г. Белоусов Вячеслав Владимирович продолжил дело своих учителей Повха И.Л. и Ступина А.Б. на посту заведующего кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И. Л. Повха. Вячеслав Владимирович – профессор, доктор технических наук, Лауреат Государственной премии по науке и технике, известный ученый в области гидродинамики, теплофизики и численного моделирования. Благодаря Белоусову В.В. кафедра приняла настоящее название в честь ее основателя Повха Ивана Лукича – «Кафедра физики неравновесных процессов, метрологии и экологии имени И. Л. Повха».



Профессор, доктор технических наук
Белоусов Вячеслав Владимирович
(30 августа 1954 – 2 июня 2020)

Под руководством Вячеслава Владимировича подготовлены 4 кандидата 1 доктор наук. Он является автором более 400 научных статей, 14 монографий, 20 учебников и учебных пособий. В последние годы на посту заведующего кафедрой Белоусов В.В. внес определяющий вклад в сохранение научного и педагогического потенциала кафедры, сохранение и развитие ее материальной базы.



Профессор, доктор технических наук
Недопекин Федор Викторович
(12 марта 1949 - 22 октября 2020)

С ноября 2020 г. по сентябрь 2025 заведующим кафедрой был старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук Асланов Петр Васильевич. Основными направлениями научных исследований Асланова П.В. являются исследование структуры турбулентных течений жидкостей и газов, разработка методов и средств контроля параметров окружающей среды, энергосберегающие технологии. Петр Васильевич имеет 100 печатных работ, 4 монографии и 6 патентов.

С сентября 2025 года обязанности заведующего кафедрой исполняет доцент, кандидат технических наук Пометун Екатерина Дмитриевна. Основные научные интересы Е.Д. Пометун лежат в сфере разработки и совершенствовании автоматизированных систем научных исследований нестационарных газовых потоков, изучении динамических характеристик термопреобразователей, решении актуальных задач в области метрологии, связанных с точностью измерений в динамических процессах.

Сегодня кафедра представлена следующим коллективом:

С июня 2020 г. по октябрь 2020 г. кафедру возглавил профессор, доктор технических наук, Лауреат Государственной премии по науке и технике Недопекин Федор Викторович.

Недопекин Ф.В. внес весомый вклад в теорию моделирования гидродинамики и тепломассопереноса. Основное направление его научных исследований – физическое и математическое моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в металлургических технологиях. Федор Викторович являлся автором более 500 работ научного и учебно-методического характера, в том числе 14 научных монографий и 20 учебных пособий, 6 патентов, под его руководством защитилось 5 кандидатов и 2 доктора наук.



Кандидат физико-математических наук, с.н.с.
Асланов Петр Васильевич

- доценты: Асланов Петр Васильевич, Быковская Наталья Владиславовна, Пометун Екатерина Дмитриевна, Фиошин Николай Васильевич, Фоменко Сергей Александрович;
- старшие преподаватели: Лебедев Владимир Николаевич, Моцак Татьяна Алексеевна, Собко Александр Юрьевич, Уткина Людмила Александровна;
- заведующие учебными лабораториями: Березина Елена Александровна; Лебедев Владимир Николаевич, Попова Альбина Евгеньевна, Фоменко Ирина Юрьевна.
- лаборанты, старшие лаборанты: Бодня Александр Степанович, Гладких Евгения Владимировна.

За последние пять лет коллективом кафедры опубликовано свыше 50 научных статей в индексируемых изданиях и более 100 тезисов докладов. Примечательно, что значительная часть работ выполнена совместно со студентами и аспирантами. Также подготовлен ряд учебных пособий для обеспечения образовательного процесса. Качественным итогом этой работы стала первая за долгое время заявка на регистрацию программы для ЭВМ, отражающая переход к прикладным и патентоспособным результатам.

В 2025 году кафедра ФНПМЭ им. И. Л. Повха совместно с Физико-техническим факультетом отметила 60-летний юбилей. Несмотря на кадровые вызовы, характерные для современного этапа, кафедра сохраняет и развивает свой мощный научный потенциал. Ключевые усилия коллектива сконцентрированы на перспективных фундаментальных и прикладных исследованиях в области аэродинамики, метрологии и прикладной экологии. Эти направления, обладая высокой практической значимостью, определяют научное лицо кафедры и служат основой для подготовки диссертационных работ и реализации инновационных проектов.

*Коллектив кафедры физики неравновесных процессов,
метрологии и экологии имени Ивана Лукича Повха*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустроочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Подписуночные подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела **фамилия(и) и инициалы автора(ов)** – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание **Ключевые слова:** – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «Поступила в редакцию хх.хх.20хх г., рекомендована к печати хх.хх.20хх г.» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, **фамилия(и) и инициалы автора(ов)**, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
- **Фамилия, имя, отчество;**
- ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
- страна, город;
- адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 681.5:621.37

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСНИ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2025 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе фотонного эхо-эффекта. Показано, что комбинирование оптических и радиотехнических ...

Ключевые слова: обработка радиосигналов, оптические методы, АСНИ, радиообстановка.

Введение. Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

Механизм формирования сигналов. Несмотря на принципиальное [4] ...

Выводы. Таким образом, не смотря на сложность протекающих процессов ...

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
2. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PHCERN.
3. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс] / Studbooks : [Сайт]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 25.01.2025).

Поступила в редакцию xx.xx.2025 г., рекомендована к печати xx.xx.2025 г.

APPLICATION OF OPTICAL INFORMATION PROCESSING METHODS IN ASRS OF SIGNALS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

This paper describes the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the photonic echo effect. It is shown that the combination of optical and radio engineering ...

Keywords: radio signal processing, optical methods, ASRS, radio substitution.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

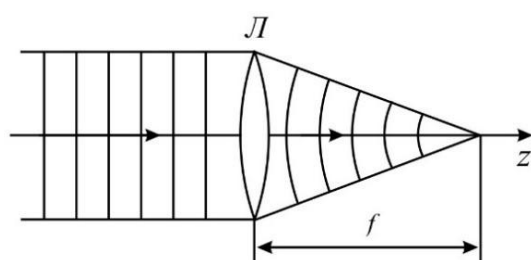


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t. \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

Контактный тел.: +7 (856) 302 07 81

Е-mail: vestnik.g@mail.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2025. – № 4.

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано к изданию 02.12.2025 г.

Адрес издателя: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
125009, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Тверская, д. 11, стр. 1;

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.