

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

1/2026

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;** д-р техн. наук, проф. **И.В. Аникин;** канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов;** канд. физ.-мат. наук **А.В. Безус;** 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. Выговтов;** д-р техн. наук, доц. **А.П. Глухов;** 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;** д-р техн. наук, доц. **И.И. Лившиц;** чл.-корр. АК РФ, д-р физ.-мат. наук, доц. **О.А. Логачев;** д-р физ.-мат. наук, проф. **И.Л. Любчанский;** канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский;** канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён;** д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров;** акад. РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов;** 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. Alekseiichik;** Dr. of tech., prof. **I.V. Anikin;** Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov;** Cand. of phys. and math. **A.V. Bezus;** 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., doc. **A.P. Glukhov;** 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. Zavadskaaia;** 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;** Dr. of tech., doc. **I.I. Livshits;** RAC Corresponding Member, Dr. of phys. and math., doc. **O.A. Logachev;** Dr. of phys. and math., prof. **I.L. Liubchanskii;** Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii;** Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen;** Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov;** RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov;** 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://dongu-vestnik04.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 **К2** 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

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №3 от 27.02.2026 г.*

**Вестник
Донецкого
национального
университета**

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

№ 1/2026

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Баширов М.Г., Крышко К.А. Применение промышленных информационно-измерительных и управляющих систем для построения цифровых двойников: опыт разработки на примере процесса гидрирования ацетилена* 5
- Захаров П.К., Торина Е.М., Rogov П.С., Лепеева И.Б., Слепов А.С. Анализ современных цифровых стандартов телевизионного вещания* 16
- Зуев В.М., Первенко Д.А., Ниценко А.В. Стабилизация положения колесного прыгающего робота* 37
- Казаков Е.А., Остапенков П.С., Щукин А.В., Филатов В.А., Гусев А.Ю. Моделирование многоканального ключевого усилителя класса D для системы широкополосной гидроакустической связи* 45
- Shalaev R.V., Izotov A.I., Variukhin V.N. Varistor effect with small nonlinearity coefficient in the "metal-to-carbon film" contact junctions* 63
- Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Исаева Ю.Д. Алгоритм обнаружения выбросов на основе Isolation Forest в системе мониторинга атмосферного воздуха* 69

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Лукьянов А.Д., Донской Д.Ю. Определение и сравнение методик идентификации и моделирования элемента Пельтье на основе его переходных характеристик* 78
- Койбаш А.А., Завадская Т.В., Мальчева Р.В. Разработка модели адаптивного представления стохастических сенсорных данных в тетралогическом базисе* 94
- Кравченко Н.М., Чернядьев И.В., Бондарчук В.В. Интеллектуальная платформа для оценки и стабилизации психоэмоционального состояния человека с использованием глубокого обучения* 104
- Салтанаева Е.А., Куценко С.М. Интеллектуальная система адаптивного подбора одежды на основе анализа метеорологических данных и пользовательского профиля* 116
- Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Бражников А.Р. Феноменологический подход к комплексной оценке сложности многомерных систем* 124

<i>Слипенко М.К., Рычка О.В. Влияние техники Prompt Engineering на точность ответов больших языковых моделей</i>	141
<i>Наумов М.А., Волуева О.С. Повышение точности определения ориентации наземного прибора на основе динамически настраиваемого гироскопа</i>	151
<i>Решетников К.И., Ронкин М.В. Разработка проблемно-ориентированной системы оценки фрагментации горных пород в режиме реального времени</i>	165

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Володин Ю.Г., Павлыш В.Н. Снижение эффективности теплоотдачи в цилиндрическом канале при резком увеличении температуры газового потока</i>	181
<i>Косорлуков И.А., Соловьев А.В., Тимченко М.С., Строчков А.В. Адаптация теории конечных автоматов для моделирования устройств интеллектуальных систем электроснабжения на основе объектно-ориентированного подхода</i>	187
<i>Гафуров М.М., Кулагина Т.А. Теплотехнические аспекты использования вихревой трубки Ранка-Хилиша в системах обогрева мобильных сооружений</i>	199
<i>Куликова О.В., Рязских В.И. Неизотермическое насыщение пористой полуграниченной изотропной среды потоком со структурой идеального вытеснения</i>	209
<i>Бирюков А.Б., Полхов С.В. Применение регрессионного анализа для оценки эффективности работы объектов генерации тепловой энергии</i>	216
<i>Шелехова О.Г. Метод определения минимального уровня тока статора асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения</i>	225

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

<i>Правила для авторов</i>	233
----------------------------	-----

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Series G: Technical sciences

№ 1/2026

CONTENTS

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Bashirov M.G., Kryshko K.A. Application of industrial information-measurement and control systems for constructing digital twins: development experience on the example of the acetylene hydrogenation process* 5
- Zakharov P.K., Torina E.M., Rogov P.S., Lepeeva I.B., Slepov A.S. Analysis of modern digital television broadcasting standards* 16
- Zuev V.M., Pervenko D.A., Nitsenko A.V. Stabilization of the position of a wheeled jumping robot* 37
- Kazakov E.A., Ostapenkov P.S., SHCHukin A.V., Filatov V.A., Gusev A.IU. Multichannel D class amplifier modeling for wideband hydroacoustic communication systems* 45
- SHalaev R.V., Izotov A.I., Variukhin V.N. Varistor effect with small nonlinearity coefficient in the "metal-to-carbon film" contact junctions* 63
- Panarin V.M., Maslova A.A., Ryleeva E.M., Isaeva IU.D. Algorithm for detecting emissions based on Isolation Forest in the atmospheric air monitoring system* 69

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Lukianov A.D., Donskoi D.IU. Determination and comparison of identification and modeling methods for a Peltier element based on its transient characteristics* 78
- Koibash A.A., Zavadskaia T.V., Malcheva R.V. Development of a model for adaptive representation of stochastic sensor data in a tetralogical basis* 94
- Kravchenko N.M., CHerniadev I.V., Bondarchuk V.V. An intelligent platform for assessing and stabilizing a persons psychoemotional state using deep learning* 104
- Saltanaeva E.A., Kutsenko S.M. Intelligent system for adaptive clothing selection based on the analysis of meteorological data and user profile* 116
- Averin G.V., Zviagintseva A.V., Brazhnikov A.R. Phenomenological approach to the complex assessment of the complexity of multidimensional systems* 124

<i>Slipenko M.K., Rychka O.V. The impact of prompt engineering on the accuracy of large languages models responses</i>	141
<i>Naumov M.A., Volueva O.S. Improving the accuracy of land-based instruments based on a dynamically adjusted gyroscope</i>	151
<i>Reshetnikov K.I., Ronkin M.V. The development of a problem-oriented system for assessing rock fragmentation in real time</i>	165

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Volodin IU.G., Pavlysh V.N. Reducing the efficiency of the cylindrical channel heat transfer by rapidly increasing the temperature of the gas flow</i>	181
<i>Kosorlukov I.A., Solovev A.V., Timchenko M.S., Strochkov A.V. Adaptation of the theory of finite automata for modeling devices of intelligent power supply systems based on an object-oriented approach</i>	187
<i>Gafurov M.M., Kulagina T.A. Thermal engineering aspects of using the Ranque-Hilsch vortex tube in heating systems for mobile structures</i>	199
<i>Kulikova O.V., Riazhsikh V.I. Non-isothermal saturation of a porous semi-bounded isotropic medium with a flow with a perfect displacement structure</i>	209
<i>Biriukov A.B., Polkhov S.V. Application of regression analysis for efficiency assessment of heat generation units</i>	216
<i>SHelekhova O.G. Development of a method for determining the minimum current level of the stator of an asynchronous motor when the supply voltage changes</i>	225

INFORMATION SECTION

<i>Instructions for authors</i>	233
---------------------------------	-----

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 XGWVDY
УДК 681.5

DOI 10.5281/zenodo.19201696

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ: ОПЫТ РАЗРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА
ГИДРИРОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА**

© 2026 *Баширов М.Г., Крышко К.А.*

В статье рассматривается использование промышленной информационно-измерительной и управляющей системы Centum VP для построения цифрового двойника химико-технологического процесса. В качестве объекта исследования выбран сложный нелинейный процесс гидрирования ацетилена. Описывается методология разработки цифрового двойника, основанная на воспроизведении мнемосхемы реального объекта и моделировании технологических параметров с использованием регрессионного анализа исторических данных. Представлены этапы построения виртуальной модели, настройку виртуальных датчиков, контроллеров и симуляции процесса. Приведены результаты валидации модели. Показаны преимущества использования уже внедрённой на производстве системы автоматизации для моделирования и её ограничения. Проведенные исследования демонстрируют, что цифровой двойник может быть реализован без привлечения специализированных сред моделирования. Научная новизна заключается в реализации цифрового двойника в рамках одной системы автоматизации, что позволяет использовать уже внедрённую на производстве инфраструктуру для моделирования и симуляции технологических процессов.

Ключевые слова: измерительная система, управляющая система, гидрирование ацетилена, моделирование процесса, цифровой двойник.

Введение. В условиях стремительного развития цифровых технологий и внедрения концепций Индустрии 4.0 всё большее внимание уделяется разработке и применению цифровых двойников (ЦД) в промышленности. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального объекта или процесса, позволяющую проводить симуляции, анализ его поведения и оптимизации режимов работы. Особенно актуален данный подход для сложных химико-технологических процессов, таких как гидрирование ацетилена, где требуется точное управление и мониторинг параметров для обеспечения стабильного качества продукта и безопасной эксплуатации оборудования.

В настоящее время цифровые двойники реализуются с использованием специализированных программных сред, таких как MATLAB, Aspen Plus, Hysys [1-3]. Подобные решения требуют интеграции с внешними системами и привлечения дополнительных ресурсов. В частности, отсутствуют единые подходы к построению цифрового двойника химико-технологического процесса внутри промышленной SCADA-системы на основе исторических данных.

В данной работе рассматривается подход к построению цифрового двойника на основе промышленной информационно-измерительной и управляющей системы Centum VP, которая традиционно применяется для управления и контроля, но в рамках исследования используется как платформа для моделирования технологического

процесса. Представленная методология включает в себя воспроизведение мнемосхемы реального объекта, построение моделей технологических параметров на основе регрессионного анализа исторических данных и реализацию виртуальной симуляции внутри системы. Такой подход позволяет минимизировать затраты на внедрение цифрового двойника и использовать уже существующую инфраструктуру и квалификацию персонала.

Целью настоящей работы является описание методики построения цифрового двойника химико-технологического процесса в промышленной информационно-измерительной и управляющей системе Centum VP, а также анализ возможностей и ограничений такого подхода. В статье рассматриваются этапы разработки модели, результаты её валидации, а также практическая целесообразность реализации подобных решений на действующих производствах.

Необходимость разработки цифрового двойника процесса гидрирования ацетилена возникла в ходе создания информационно-измерительной и управляющей системы [4]. В рамках предыдущих исследований была разработана система, включающая виртуальный анализатор на основе регрессионных моделей с оптимизацией весовых коэффициентов генетическим алгоритмом, алгоритм управления процессом с применением виртуального анализатора. Целью исследований является совершенствование процесса гидрирования ацетилена.

Для реализации цифрового двойника процесса гидрирования ацетилена в среде Centum VP была поставлена задача разработать виртуальную модель используя только встроенные средства системы. Разработка цифрового двойника в рамках промышленной информационно-измерительной и управляющей системы включала в себя несколько этапов: анализ реального объекта, подготовку и обработку данных, воспроизведение мнемосхемы, построение моделей технологических параметров и реализацию виртуальной симуляции. Все этапы были выполнены с минимальным использованием сторонних инструментов, что позволило сохранить автономность и воспроизводимость подхода в рамках одной системы.

Анализ реального объекта и подготовка исходных данных. В качестве объекта исследования был выбран процесс гидрирования ацетилена – сложный химико-технологический процесс, характеризующийся нелинейными зависимостями между входными и выходными параметрами [5]. Анализ объекта включал выявление ключевых контролируемых параметров, определяющих конверсию ацетилена. Дополнительно был проведен анализ диапазонов технологических параметров и характера их изменения в типовых режимах работы. Это позволило сформировать информативный набор входных и выходных переменных.

Для построения модели были использованы исторические данные, выгруженные из действующей автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Эти данные включали значения температуры, давления, расходов реагентов и концентраций. На этапе подготовки данных проводилась предварительная фильтрация с целью исключения аномальных значений.

Воспроизведение мнемосхемы реального объекта. Центральным элементом визуализации в системе Centum VP является мнемосхема – графическое представление технологического процесса, на котором отображаются параметры, управляющие элементы и текущее состояние оборудования [6, 7]. Для построения цифрового двойника была воспроизведена мнемосхема реального объекта, включая основные аппараты (реактор и смеситель), трубопроводы, датчики и исполнительные механизмы (рис. 1).

Такой подход позволил использовать мнемосхему как основу для дальнейшего моделирования и симуляции. Применение оригинальной мнемосхемы действующего объекта дает возможность операторам и инженерам взаимодействовать с цифровым двойником в привычном для них формате [8].

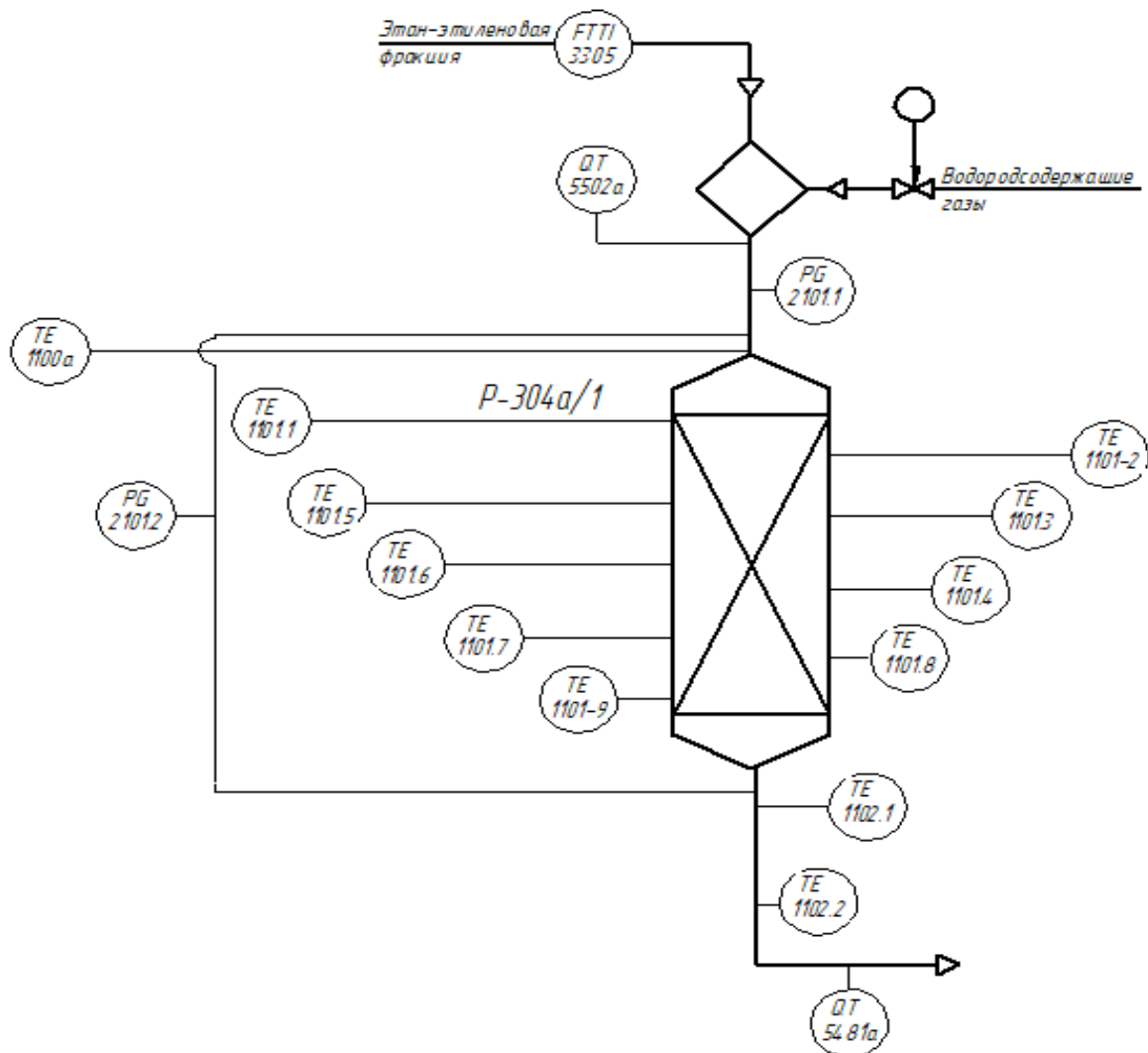


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации реактора гидрирования ацетилена

Перед воспроизведением мнемосхемы была разработана структура цифрового двойника, определяющая взаимосвязи между компонентами модели (рис. 2). Структура включает три основных уровня:

- уровень данных;
- уровень моделирования;
- уровень визуализации и управления;

На первом уровне используются исторические данные из АСУ ТП.

На уровне моделирования применяются функциональные блоки в Centum VP, реализующие математические зависимости между входными и выходными параметрами.

Финальный уровень заключается в построении мнемосхемы, на которой отображаются моделируемые параметры (рис. 3). Также здесь реализованы виртуальные ПИД-регуляторы для замкнутого цикла управления.



Рис. 2. Структурная схема цифрового двойника

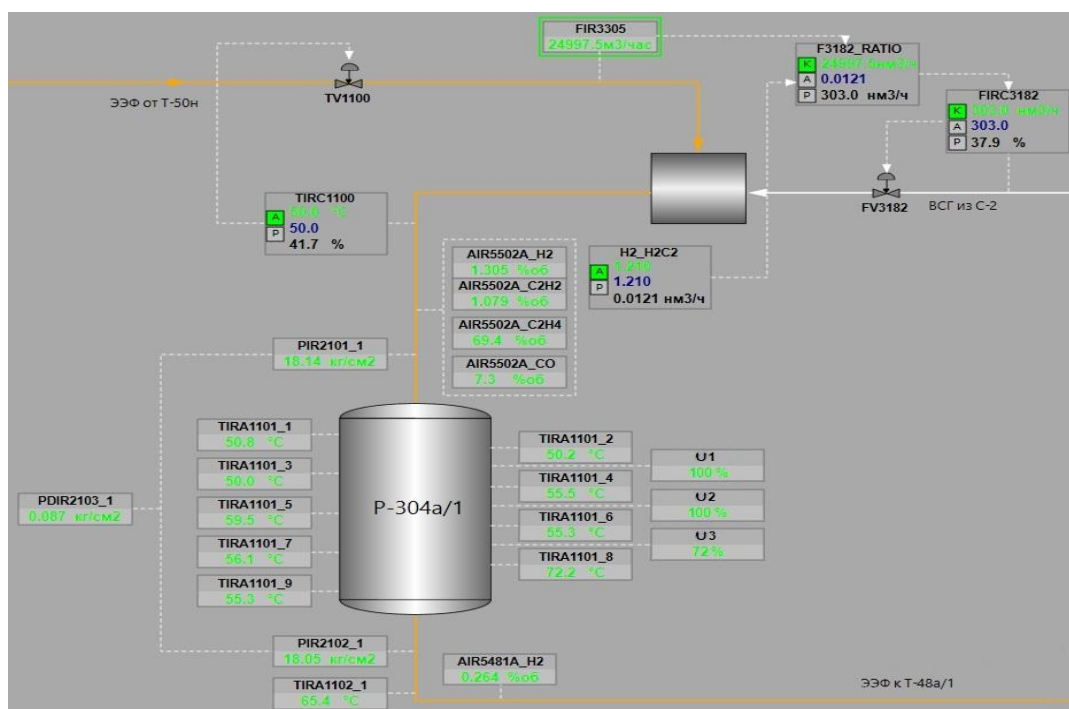


Рис. 3. Мнемосхема объекта исследования

На мнемосхеме (рис. 3) представлены основные элементы технологического процесса. Реактор гидрирования ацетилена и смеситель. В смесителе осуществляется подготовка реакционной смеси из этан-этиленовой фракции и водородсодержащих фракции газов.

Визуализация включает следующие группы приборов:

- температура;
- давление;
- расход веществ;
- анализаторы качества.

Температура измеряется в девяти точках, равномерно распределенных по высоте реактора, а также перед и после реактора. Давление измеряется перед и после реактора, дополнительно измеряется перепад давления. Расходы веществ контролируются по линиям подачи этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) и водородсодержащих газов (ВСГ). Перед реактором установлен анализатор качества по водороду, этилену, ацетилену, оксиду углерода. После реактора установлен анализатор качества по водороду.

Построение моделей технологических параметров. Для воспроизведения динамики процесса в Centum VP были разработаны модели технологических параметров на основе регрессионного анализа исторических данных. Подход заключался в следующем:

- для каждой выходной переменной определялись наиболее значимые входные параметры;
- на основе выделенных зависимостей строились регрессионные модели;
- полученные уравнения были реализованы в виде вычислительных блоков внутри Centum VP, что позволило динамически рассчитывать значения параметров в режиме симуляции.

Важно отметить, что все модели были ориентированы на воспроизведение поведения реального процесса, а не на высокую точность прогноза, что позволило сохранить их простоту и устойчивость в рамках информационно-измерительной и управляющей системы. Регрессионный анализ был выбран в качестве основного метода моделирования технологических параметров вследствие его возможности реализации в виде арифметических выражений в функциональных блоках Centum VP. Несмотря на ограниченную способность описывать сильные нелинейности, линейные и полиномиальные модели показали достаточную точность в рабочем диапазоне процесса, что подтверждено последующей валидацией.

Реализация виртуальной симуляции. Для имитации работы реального оборудования в Centum VP были использованы следующие инструменты:

- виртуальные датчики, реализованные на основе вычислительных блоков (Function Blocks), которые генерируют сигналы согласно моделируемым параметрам;
- виртуальные контроллеры с воспроизведением работы ПИД-регуляторов, обеспечивая замкнутый цикл управления. Данные контроллеры принимают сигналы от виртуальных датчиков и формируют управляющие воздействия на исполнительные механизмы модели.

Выполненные действия позволили организовать замкнутую систему автоматического управления, аналогично реальной АСУ ТП.

Особенности реализации в Centum VP. Реализация цифрового двойника в Centum VP имеет ряд особенностей, отличающих её от традиционных подходов:

- использование встроенных функциональных блоков вместо внешних математических пакетов;
- графическая привязка моделей к мнемосхеме обеспечивает наглядность и простоту интерпретации;
- возможность интеграции с реальной системой (в теории) через V-Net или OPC-серверы. В рамках текущих исследований такая интеграция не проводилась;
- простота модификации – изменения в модели можно вносить непосредственно в рабочей среде без перекомпиляции всей системы.

Анализ результатов. Для валидации модели использовались данные, выгруженные из АСУ ТП реального объекта. Для каждого технологического параметра проводилось сравнение расчётных значений и архивных значений, зарегистрированных в АСУ ТП (рис. 4-6).

Ниже приведена регрессионная модель для расчета температуры в верхней части реактора:

$$y_1(x) = -0,1847 \cdot x^2 + 3,3091 \cdot x - 68,511,$$

где x – температура смеси ЭЭФ и ВСГ перед реактором; $y_1(x)$ – температура верхней части реактора.

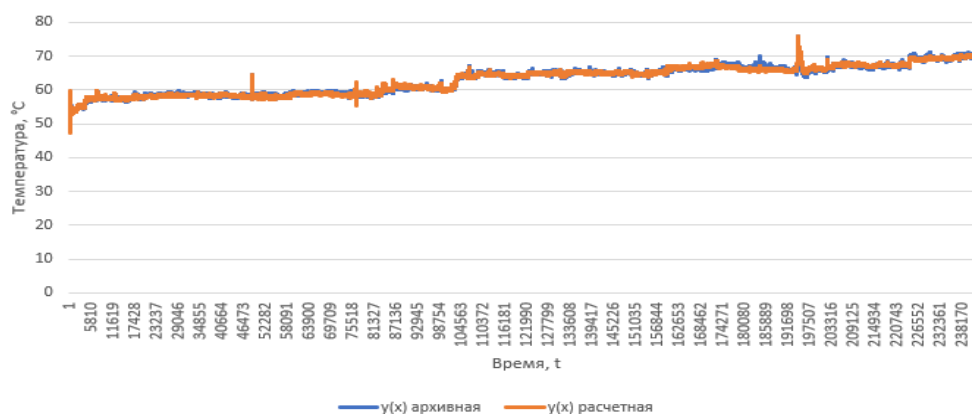


Рис. 4. Сравнение расчетных и архивных данных по температуре в верхней части реактора

Для количественной оценки точности модели был рассчитан перечень погрешностей. Указан пример полученных погрешностей для той же температуры упомянутой ранее.

Абсолютная погрешность:

$$\Delta X = |52,9 - 53,3| = 0,4^\circ\text{C}.$$

Относительная погрешность:

$$\delta = \frac{0,4}{53,3} \cdot 100\% = 0,75\%.$$

Систематическая погрешность:

$$\Delta X_{\text{системат}} = \frac{0,4 + 0,5 + 0,5 + 0,3 + 0,4 + 0,2 + 0,4 + 0,3 + 0,7 + 1,1}{10} = 0,46^\circ\text{C}.$$

Случайная погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,5956}{9}} \approx 0,257^\circ\text{C}.$$

Если для температуры в верхней части реактора модель показала высокую сходимость с архивными данными, то в средних и нижних зонах реактора точность модели снижается. Это связано с увеличением нестабильности технологического режима в нижней части реактора, где завершается основная часть реакции гидрирования ацетилена. В этих зонах наблюдаются более выраженные нелинейные эффекты, связанные с изменением состава газовой фазы, локальными перегревами и неоднородностью распределения катализатора.

Регрессионная модель для расчета температуры в средней части реактора:

$$y_2(x) = -0,5339 \cdot x^2 + 7,6681 \cdot x - 194,39,$$

где x – температура смеси ЭЭФ и ВСГ перед реактором; $y_2(x)$ – температура средней части реактора.

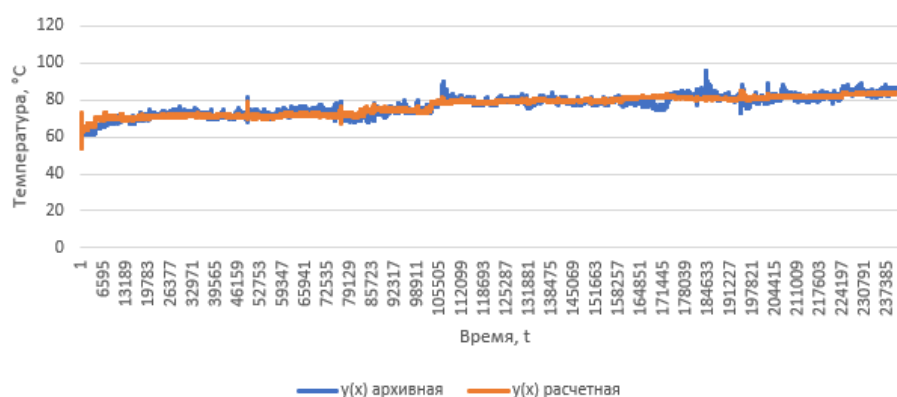


Рис. 5. Сравнение расчетных и архивных данных по температуре в средней части реактора

Абсолютная погрешность:

$$\Delta X = |63,0 - 65,1| = 2,1^{\circ}\text{C}.$$

Относительная погрешность:

$$\delta = \frac{2,1}{65,1} \cdot 100\% = 3,22\%.$$

Систематическая погрешность:

$$\Delta X_{\text{системат}} = \frac{2,1 + 2,2 + 2,3 + 2,1 + 2,2 + 2,1 + 2,3 + 2,0 + 2,9 + 3,4}{10} = 2,4^{\circ}\text{C}.$$

Случайная погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,764}{9}} \approx 0,443^{\circ}\text{C}.$$

Регрессионная модель для расчета температуры в нижней части реактора:

$$y_3(x) = -0,2489 \cdot x^2 + 3,9827 \cdot x - 64,73,$$

где x – температура смеси ЭЭФ и ВСГ перед реактором; $y_3(x)$ – температура нижней части реактора.

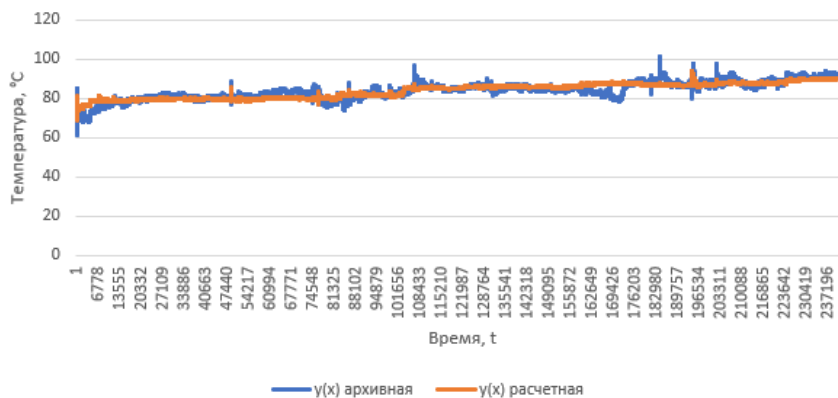


Рис. 6. Сравнение расчетных и архивных данных по температуре в нижней части реактора

Абсолютная погрешность:

$$\Delta X = |74,4 - 76,9| = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Относительная погрешность:

$$\delta = \frac{2,5}{76,9} \cdot 100\% = 3,25\%.$$

Систематическая погрешность:

$$\Delta X_{\text{системат}} = \frac{2,5 + 2,9 + 3,1 + 3,2 + 3,6 + 3,5 + 3,6 + 3,3 + 3,6 + 3,9}{10} = 3,3^{\circ}\text{C}.$$

Случайная погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,515}{9}} \approx 0,410^{\circ}\text{C}.$$

Сравнение проводилось для нескольких режимов работы, включая переходные процессы, чтобы оценить поведение модели в разных условиях.

Все расчёты проводились по выборке из нескольких эксплуатационных сценариев. В качестве типового сценария выбрано ступенчатое изменение задания с 50°C до 60°C .

На рисунке 7 представлено поведение температуры в начальной зоне реактора в ходе имитации переходного процесса. Благодаря близости точки измерения к месту подачи смеси в реактор, инерционность системы невелика. Время запаздывания составляет около 5 секунд, что объясняется характерной для тепловой системы инерционностью. После чего температура плавно достигает нового установившегося значения. Перерегулирование отсутствует, статическая ошибка в конечном состоянии выражается в сотых долях. Время регулирования составило около 80 секунд.

Хотя прямое сопоставление с архивными данными в переходных режимах затруднено из-за отсутствия соответствующих записей в АСУ ТП, поведение модели соответствует физическому смыслу процесса и подтверждает её работоспособность в динамических условиях.

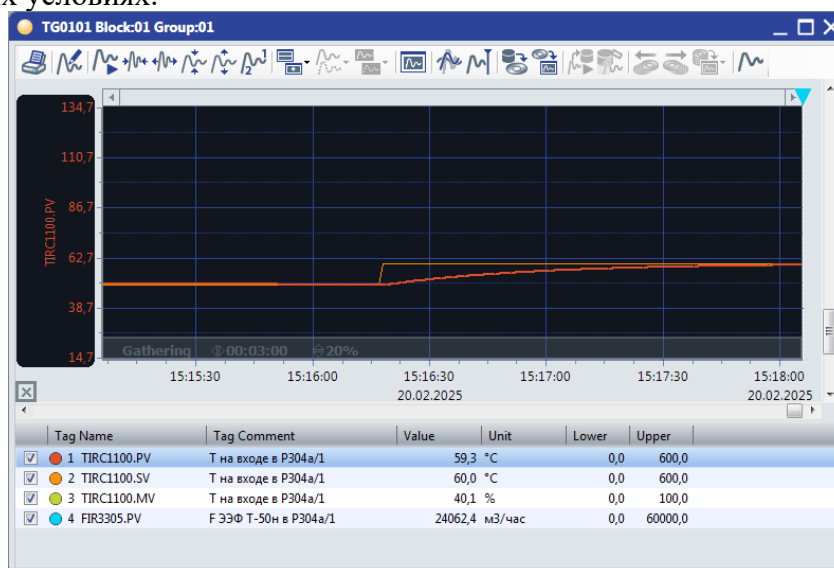


Рис. 7. Результаты тестирования переходного процесса

Для оценки устойчивости модели к изменениям входных параметров был проведён анализ чувствительности. Он заключался в изменении одного из ключевых параметров на $\pm 5-10\%$ и наблюдении за реакцией модели.

Анализ показал, что модель сохраняет адекватное поведение в пределах рабочего диапазона, однако при выходе за границы диапазона наблюдается рост погрешности, что связано с ограниченной способностью линейных моделей воспроизводить нелинейные эффекты.

Представленный в работе подход к построению цифрового двойника в промышленной SCADA-системе Centum VP имеет ряд существенных преимуществ, которые делают его положительным для внедрения на действующих промышленных объектах.

Преимущества подхода:

- подход не требует внедрения специализированных программных пакетов моделирования. Вся разработка и симуляция проводились в используемой на производстве системе. Это позволяет сократить затраты на приобретение программного обеспечения и обучение персонала;

- модель процесса реализована в виде мнемосхемы, привычной для операторов и инженеров АСУ ТП. Это облегчает восприятие модели и взаимодействие с ней;

- использование встроенных функциональных блоков Centum VP позволило реализовать модели технологических параметров без привлечения внешних вычислительных инструментов. Это упрощает модификацию и сопровождение модели.

- Centum VP поддерживает протоколы V-Net, OPC, Modbus и другие, что потенциально позволяет использовать цифровой двойник в гибридных архитектурах и интегрировать его с другими системами.

Ограничения подхода:

- Centum VP – это не специализированная среда моделирования, возможности построения сложных нелинейных моделей ограничены. Для более точного воспроизведения поведения объекта могут потребоваться дополнительные вычислительные инструменты;

- для реализации модели требуются навыки работы с функциональными блоками, тегами и настройкой мнемосхем, что может затруднить внедрение подхода без квалифицированного специалиста;

- в работе использовались линейные регрессионные модели, которые могут не отражать сложные нелинейные зависимости. Это ограничивает точность модели в условиях значительных изменений технологического режима.

Выводы. В ходе проведённого исследования была разработана и описана методология построения цифрового двойника химико-технологического процесса в промышленной информационно-измерительной и управляющей системе Centum VP. На примере процесса гидрирования ацетилена показано, что цифровой двойник может быть реализован без использования специализированных программных сред, что делает подход экономически целесообразным и доступным для внедрения на действующих производствах.

Модель прошла валидацию по данным реального объекта и показала достаточную точность для задач симуляции и обучения. Определены границы применимости модели: она наиболее эффективна в условиях близким к штатным. Для её расширения на динамически сложные режимы, характеризующиеся выраженными нелинейными эффектами, необходимо совершенствование математического аппарата модели.

Анализ чувствительности подтвердил её устойчивость в пределах рабочего диапазона параметров. Представленный подход может быть использован для обучения персонала и для предварительной отработки алгоритмов управления.

Перспективы дальнейших исследований включают повышение точности модели за счёт учёта нелинейных эффектов, интеграцию с реальной АСУ ТП, расширение функциональности с помощью внешних вычислительных модулей.

Выполненная работа демонстрирует, что промышленные информационно-измерительные и управляющие системы могут быть эффективно использованы не только для управления, но и для моделирования и симуляции. Применение действующих систем автоматизации открывает возможности для цифровизации промышленных процессов без значительных затрат на внедрение новых технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка цифровых двойников типовых технологических процессов / В. Ю. Невиницын, П. Н. Грименицкий, И. К. Ваняйкин, Д. С. Отлягузов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2025. – №1. – С. 111-117.
2. Рахманов, М. Л. Современные цифровые технологии и цифровой двойник // М. Л. Рахманов, А. В. Шишкин // Качество и жизнь. – 2021. – №2. – С. 57-59.
3. AI-Driven Digital Twin and Industry 4.0: A Conceptual Framework with Applications / S. Rani [et al.]. – CRC Press, 2024. – 338 p.
4. Баширов, М. Г., Информационно-измерительная и управляющая система гидрирования ацетилена / М. Г. Баширов, К. А. Крышко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – № 4 (13). – С. 1-10.
5. Гидрирование ацетилена на PD-ZN/сибунит-катализаторе: влияние растворителя и монооксида углерода / Д. В. Глыздова, Т. Н. Афонасенко, В. Л. Темерев, Д. А. Шляпин // НЕФТЕХИМИЯ. – 2021. – Т. 61. – № 3. – С. 388-396.
6. Баширов, М. Г. Программно-техническая реализация информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена / М. Г. Баширов, К. А. Крышко, А. М. Хафизов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2024. – № 4. – Т. 20. – С. 92-99.
7. Distributed Control System (DCS) Centum VP [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/distributed-control-systems-dcs/centum-vp/#Details> (дата обращения: 28.08.2025).
8. Готеляк, А. В. Использование цифровых двойников промышленных объектов в рамках обучения инженерных кадров / А. В. Готеляк // Инженерное образование в цифровом пространстве: Материалы Международной научно-методической конференции в двух частях. – Минск: БГУИРЭ. – 2024. – С. 203-205.

REFERENCES LIST

1. Razrabotka tsifrovyykh dvoynikov tipovykh tekhnologicheskikh protsessov / V. Yu. Nevinitsyn, P. N. Grimenitskii, I. K. Vaniaikin, D. S. Otliauzov // Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie. – 2025. – №1. – S. 111-117.
2. Rakhmanov, M. L. Sovremennyye tsifrovyye tekhnologii i tsifrovoy dvoynik // M. L. Rakhmanov, A. V. Shishkin // Kachestvo i zhizn. – 2021. – №2. – S. 57-59.
3. AI-Driven Digital Twin and Industry 4.0: A Conceptual Framework with Applications / S. Rani [et al.]. – CRC Press, 2024. – 338 p.
4. Bashirov, M. G., Informatsionno-izmeritelnaia i upravliaiushchaia sistema gidrirovaniia atsetilena / M. G. Bashirov, K. A. Kryshko // Modelirovanie, optimizatsiia i informatsionnye tekhnologii. – 2025. – № 4 (13). – S. 1-10.
5. Gidrirovaniie atsetilena na PD-ZN/sibunit-katalizatore: vliianie rastvoritel'ia i monooksida ugleroda / D. V. Glyzdova, T. N. Afonassenko, V. L. Temerev, D. A. Shliapin // NEFTEKhimIia. – 2021. – T. 61. – № 3. – S. 388-396.
6. Bashirov, M. G. Programmno-tekhnicheskaiia realizatsiia informatsionno-izmeritelnoi i upravliaiushchei sistemy protsessa gidrirovaniia atsetilena / M. G. Bashirov, K. A. Kryshko, A. M. Khafizov // Elektrotekhnicheskiiye i informatsionnye kompleksy i sistemy. – 2024. – № 4. – T. 20. – S. 92-99.

7. Distributed Control System (DCS) Centum VP [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/distributed-control-systems-dcs/centum-vp/#Details> (data obrashcheniia: 28.08.2025).
8. Goteliak, A. V. Ispolzovanie tsifrovyykh dvoynikov promyshlennykh obiektov v ramkakh obucheniia inzhenernykh kadrov / A. V. Goteliak // Inzhenernoe obrazovanie v tsifrovom prostranstve: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii v dvukh chastiakh. – Minsk: BGUIRE. – 2024. – S. 203-205.

Поступила в редакцию 22.09.2025 г., рекомендована к изданию 14.01.2026 г.

APPLICATION OF INDUSTRIAL INFORMATION-MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS FOR CONSTRUCTING DIGITAL TWINS: DEVELOPMENT EXPERIENCE ON THE EXAMPLE OF THE ACETYLENE HYDROGENATION PROCESS

Bashirov M.G., Kryshko K.A.

The article discusses the use of the Centum VP industrial information, measurement and control system to build a digital twin of a chemical process. The complex nonlinear process of acetylene hydrogenation was chosen as the object of the study. The methodology of developing a digital twin is described, based on reproducing the mnemonic scheme of a real object and modeling technological parameters using regression analysis of historical data. The stages of building a virtual model, setting up virtual sensors, controllers, and simulating the process are presented. The results of model validation are presented. The advantages of using an automation system already implemented in production for modeling and its limitations are shown. The conducted research demonstrates that a digital twin can be implemented without involving specialized modeling environments. The scientific novelty lies in the implementation of a digital twin within the framework of a single automation system, which makes it possible to use the infrastructure already implemented in production for modeling and simulation of technological processes.

Keywords: measuring system, control system, acetylene hydrogenation, process modeling, digital twin.

Баширов Мусса Гумерович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и автоматизации промышленных предприятий Института нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.
E-mail: eapp@yandex.ru

Bashirov Mussa Gumerovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Institute of Oil Refining and Petrochemistry of the of Ufa State Petroleum Technological University, Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.
ORCID: 0000-0001-7493-6803

Крышко Константин Алексеевич

старший преподаватель кафедры электрооборудования и автоматизации промышленных предприятий Института нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.
E-mail: kryshko.usptu@mail.ru

Kryshko Konstantin Alekseevich

Senior Lecturer at Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Institute of Oil Refining and Petrochemistry of the of Ufa State Petroleum Technological University, Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.
ORCID: 0000-0002-0990-5813

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ СТАНДАРТОВ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

© 2026 Захаров П.К., Торина Е.М., Рогов П.С., Лепеева И.Б., Слепов А.С.

В данной работе приведены история развития мирового телевизионного вещания, описание цифровых телевизионных стандартов, используемых в мире, их наиболее важные характеристики, описание протоколов сжатия, помехоустойчивого кодирования, примеры применения в автомобильной промышленности.

Ключевые слова: стандарты цифрового ТВ вещания, протоколы сжатия информации, помехоустойчивое кодирование, фазовая, амплитудная, амплитудно-фазовая манипуляция сигналов, сигнальное созвездие.

Введение. Современная эпоха характеризуется глубочайшей цифровой трансформацией, которая затронула все сферы человеческой деятельности. Одной из таких сфер является телевидение. Современная телевизионная индустрия пережила фундаментальную трансформацию, связанную с переходом от аналоговых к цифровым технологиям вещания. Цифровое телевидение коренным образом изменило подход к передаче, сжатию и восприятию телевизионного сигнала, обеспечив высокое качество изображения и звука, увеличение количества каналов в том же частотном диапазоне, а также внедрение интерактивных сервисов [1]. Пришедшее на смену аналоговому сигналу цифровые форматы позволили передавать телевизионный контент с качеством High Definition (HD) и Ultra HD и многоканальным звуком.

Актуальность темы данной работы обусловлена повсеместным распространением цифрового телевидения и необходимостью понимания основных принципов, лежащий в его основе [2]. В современном мире разные страны используют различные форматы для передачи телевизионных сигналов. Мир можно разделить на условные четыре зоны, в которых используются разные стандарты телевизионного вещания: Европа и Российская Федерация, Северная Америка и Корея, Япония и Латинская Америка, Китай. Постоянная модернизация и изменение телевизионных стандартов приводит к необходимости понимания устройства существующих стандартов [3, 4]. В современных транспортных средствах (ТС) устанавливаются средства ТВ вещания для развлечения пассажиров при перемещении.

Целью данной работы является комплексный анализ и сравнение основных мировых стандартов цифрового телевидения. Основными критериями сравнения будут рабочие диапазоны частот, скорости передачи информации, используемые виды модуляции сигнала и виды помехоустойчивого кодирования, а также методы сжатия информации. Объектом исследования являются различные ключевые цифровые стандарты ТВ вещания, применяющихся в регионах, разделяющих мир на зоны использования преимущественно определенных цифровых стандартов ТВ вещания.

Основы цифрового телевидения. Развитие телевизионного вещания. Прежде, чем сравнивать цифровые стандарты ТВ вещания (далее вещание) необходимо проанализировать развитие вещания в целом. Необходимо проанализировать переход от аналогового вещания к цифровому.

Первоначальное вещание использовало для формирования изображения его разложение на элементы в последующего синтеза с помощью электромеханических устройств. Появление электромеханического вещания относят к концу 19 века, однако регулярное вещание началось лишь в 1928 в Чикаго. Первоначальное вещание проводилось без звука. В 1929 году к этому телевещанию был добавлен звук. Для передачи звука использовалась отдельная передающая радиостанция, излучающая звуковой сигнал на отдельной несущей частоте, что и видеосигнал, но одного частотного диапазона. В Союзе Советских Социалистических Республик (СССР) электромеханическое вещание началось в 1934 году. Устройство передачи сигнала также использовало две разные антенны для передачи видеосигнала и звукового сигнала [5]. Дальнейшим развитием стало появление стандартов черно-белого вещания [6].

Переход к цветному аналоговому вещанию начинается в 1953 году, когда в Соединенных Штатах Америки (США) начинается вещание по стандарту National Television System Committee (NTSC). В формате NTSC в дополнение к сигналу яркости, который достался стандарту от черно-белого стандарта, использовались цветоразностные сигналы, несущих информацию о красном и синих цветах изображения. Недостающая информация о зеленом цвете восстанавливалась в приемнике за счет разности сигнала яркости и сумм цветоразностных сигналов. Для передачи информации используется квадратурная модуляция [7]. К достоинствам NTSC относится хорошая совместимость с черно-белым телевидением, так как при приеме сигнал черно-белым телевизором цветоразностные сигналы просто игнорируются приемником. Главным недостатком NTSC является высокая чувствительность к амплитудно-фазовым искажениям сигнала в канале передачи. Такие искажения вызывают нарушения цветопередачи, которые невозможно устранить автоматической регулировкой усиления сигнала. Наиболее явно эти искажения заметны на цвете кожи, в особо ярких участках она могла иметь зеленый оттенок из-за искажений.

В 1966 году в качестве альтернативы NTSC был разработан Phase Alternating Line (PAL). Данный формат разработан в Германии и был принят в качестве стандарта аналогового ТВ вещания в большинстве стран Европы. Передача информации о цвете изображения повторяла устройство стандарта NTSC и использовалась квадратурная модуляция. Отличие заключалось в том, что фаза одной из квадратурных составляющих цветоразностного сигнала, несущего информацию о красном цвете, изменяется от строки к строке на противоположную (на π). Данное изменение решает проблему высокой чувствительности к амплитудно-фазовым помехам, так как при устранении фазовой ошибки декодер складывает текущую строку и предыдущую. Сложение требовало большой точности времени задержки для декодера, так как для корректного суммирования необходимо, чтобы сигнал текущей и предыдущей строк оказались в фазе или противофазе.

Следующим появившемся стандартом аналогового цифрового телевидения является *Séquentiel couleur à mémoire* (SECAM). Стандарт SECAM разработан совместной работой французских и советских исследователей и принят в качестве стандарта телевещания в 1967 году. Устройство передачи информации о изображении устроен также, как в стандартах NTSC и PAL. Главной особенностью стандарта SECAM является поочередная передача цветоразностных сигналов о красном и синем цвете изображения. Сигнал, передаваемый в течение воспроизведения одной строки, сохраняется в течение воспроизведения двух строк. Таким образом достигается

отсутствие перекрестных искажений между цветоразностными сигналами ввиду их поочередной передачи. Благодаря использованию частотной модуляции при передаче сигнала SECAM стал устойчивее к фазовым искажениям в отличие от NTSC.

Активное развитие цифровых технологий во всех сферах жизни привело к вопросу о создании цифрового ТВ вещания. Развитие микроэлектроники позволили существенно уменьшить размер устройств приема и обработки ТВ сигналов, и развитие новых технологий сжатия информации позволило существенно уменьшить вес передаваемых цифровых сообщений без особых потерь качества итогового изображения и звука [8].

В 1984 году появился стандарт видеосжатия H.120. Изначально формат сжатия предназначался для аналогового ТВ стандартов NTSC и PAL. Для NTSC скорость передачи информации составляет 1544 кбит/с, скорость передачи для PAL составляет 2048 кбит/с. Однако, данный стандарт сжатия имел недостаточное качество распакованных изображений для постоянного использования. Проблема стандарта H.120 заключалась в отдельной кодировке точек изображения. Сжатие по стандарту H.120 основано на дифференциальной импульсно-кодовой модуляции. Появившийся в 1988 году H.261 кодировал точки изображения группами, вследствие чего качество декодированного изображения стало выше. Сжатие по стандарту H.261 основано на дискретном косинусном преобразовании. В 1993 году появился формат сжатия стандарт видеосжатия Moving Picture Experts Group (MPEG). Главной особенностью данного стандарта сжатия являлось восстановление изображения не только по предшествующим опорным кадрам, но и по последующим, что существенно увеличивало качество итогового изображения [9]. В 1998 году появился один из наиболее популярных в использовании стандарта видеосжатия MPEG-4. Стандарт MPEG-4 позволял осуществлять многокадровое предсказание в отличие от предыдущих форматов сжатия. Многокадровое предсказание осуществлялось за счет возможности использовать до 32 ссылок на другие кадры. Также порядок опорных кадров мог быть любой, в отличие от прошлых стандартов, где последовательность опорных кадров выстраивалась жестко. Появившийся в 2003 году стандарт видеосжатия H.264 обладал тем же рядом преимуществ, что и стандарт MPEG-4, однако, качество предсказания изображения было выше, чем у MPEG-4 [10].

С конца 1990-х годов до середины 2000-х были сформированы четыре основных стандарта цифрового вещания Digital Video Broadcasting (DVB), Advanced Television System Committee (ATSC), Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB), Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB), которые используются в различных странах мира до сих пор.

Принципы формирования цифрового ТВ сигнала. ТВ сигнал формируется за счет аналого-цифрового преобразования (АЦП). АЦП заключается в дискретизации и квантовании аналоговых сигналов, из которых изначально было сформировано изображение и звуковая дорожка. Сначала сигнал дискретизируется во временной области, преобразуется в последовательность коротких амплитудно-модулированных импульсов отсчетов изначального сигнала. Расстояния между соседними отсчетами одинаково и равно периоду дискретизации, величине, обратной частоте дискретизации аналого-цифрового преобразователя. Квантование заключается в разбиении сигнала на диапазоны значений по амплитуде некоторой величины на конечное число уровней и округление этих значений до ближайших к ним уровней. Округление может осуществляться до меньшего или большего из ближайших уровней или до среднего значения ближайших уровней. Существует два вида квантования сигнала: равномерное

квантование, квантование с использованием компандирования. При равномерном квантовании шаг квантования не изменяется, что является недостатком данного способа квантования при слабом сигнале. Квантование с использованием компандирования основан на изменении шага квантования в зависимости от мощности входного сигнала. При слабом сигнале шаг квантования будет меньше, с ростом мощности сигнала увеличивается шаг квантования. При квантовании сигнала таким способом происходит компрессия исходного сигнала, что дает преимущество в виде уменьшенного объема данных для передачи одинакового объема информации. Для восстановления исходного сигнала необходимо провести экспандирование преобразованного сигнала, который восстанавливает мощность сигнала [11].

Также важным принципом формирования цифрового ТВ сигнала является сжатие передаваемого видеосигнала и звука. Основным способом сжатия на настоящее время является стандарт MPEG-4, подробное описание которого представлено в стандарте [12]. В данном стандарте определены несколько профилей: базовый, основной и расширенный. Базовый профиль используется для кодирования и декодирования в реальном времени для мобильных устройств, основной профиль предназначен для использования в широкоэффетивной передаче, расширенный профиль используется в средствах передачи, поврежденных ошибками [13].

Еще одним важным принципом является формирование единого транспортного потока (Transport Stream (TS)), который объединяет в себе видео, аудио и общую информацию в едином частотном канале. Таким протоколом TS является MPEG-TS. На рис. 1 изображена принцип работы протокола MPEG-TS.

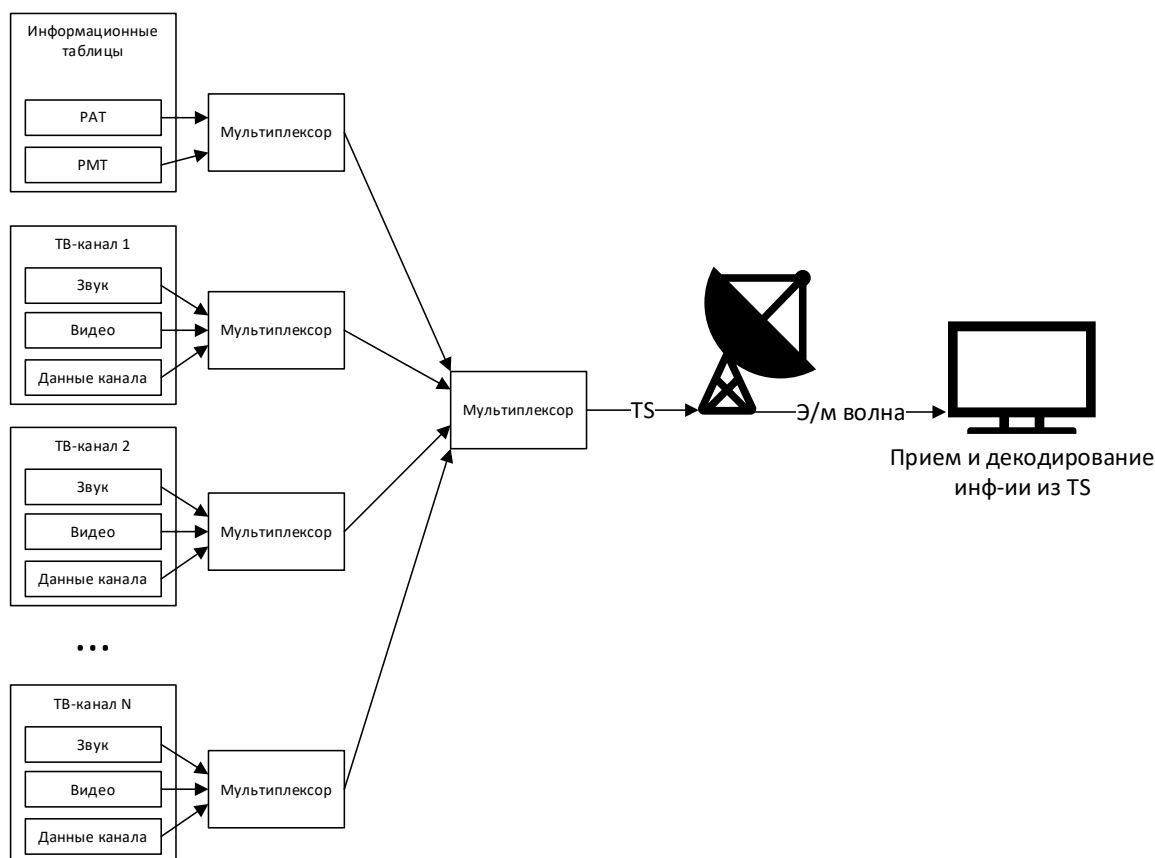


Рис. 1. Принцип работы протокола MPEG-TS

При использовании протокола MPEG-TS данные о ТВ-канале (видеоряд, аудиоряд и информация о ТВ-канале) передаются совместно в едином частотном канале. Для определения устройством-приемником разницы между ТВ-каналами также передаются таблицы Program Association Table (PAT) и Program Map Table (PMT). PAT содержит в себе информацию о том, какие сервисы (ТВ-каналы) имеются в TS. Каждому сервису присваивается свой идентификационный номер. PMT содержит в себе Packet Identifier (PID) видео, аудио и иной информации, входящей в состав каждого сервиса. PID необходим для корректного отличия сервисов в TS. Подробнее о протоколе MPEG-TS и его использовании изложено в [14].

Еще одним важным принципом формирования ТВ сигнала является используемая модуляция. В разных стандартах цифрового ТВ вещания используются разные модуляции. В стандарте DVB используется модуляция Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM) [15], которая является производной от модуляции Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). OFDM модуляция основана на принципе модулирования сигнала с использованием большого количества близко расположенных ортогональных поднесущих. Каждая поднесущая разнесены по частоте на равные интервалы. COFDM отличается от OFDM возможностью канального кодирования, которое позволяет использовать прямую коррекцию ошибок. В стандарте ATSC используется модуляция 8 Vestigial Side Band (VSB). 8VSB преобразует двоичный поток в восьмеричное представление путем изменения амплитуды несущей на один из восьми уровней.

Мировые стандарты цифрового ТВ вещания. Использование разных стандартов цифрового ТВ вещания делят мир на четыре основные зоны. Большая часть Африки, Евразии и Океании используют стандарт цифрового вещания семейства DVB, Северной и Центральной Америки используют стандарт цифрового вещания семейства ATSC, Япония и Южная Америка используют стандарт цифрового вещания семейства ISDB и Китай использует стандарт цифрового вещания семейства DTMB.

Семейство стандартов DVB. Стандарты семейства DVB разработано компанией European Launching Group, которая основана в 1991 и впоследствии переименована в DVB Project. Первым выпущенным стандартом спутникового цифрового ТВ вещания является DVB-S (Satellite service). Принцип вещания основан на передаче сигнала через геостационарный спутник. Для спутникового ТВ вещания используется два частотных диапазона, частотные значения которых сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Частотные диапазоны спутникового ТВ вещания

Диапазон «С», ГГц	Диапазон «Ku», ГГц		
	1-й поддиапазон	2-й поддиапазон	3-й поддиапазон
3,625-4,2	10,7-11,7	11,7-12,5	12,5-12,75

Для использования разных частотных диапазонов используются зеркальные антенны разного диаметра. Для «С» диапазона обычно используются зеркальные антенны диаметром от 1,8-2 м, для «Ku» диапазона – до 1 м.

Первый принятый стандарт DVB-S использовал частотный диапазон 11-12 ГГц [16]. На рис. 2 изображена схема системы по стандарту DVB-S, где левый блок «Формирование TS» повторяет схему рис. 1. Для сжатия информации использовался стандарт MPEG-2.

Кодирование сигнала происходит по коду Рида-Соломона (код (204, 188)). Код Рида-Соломона является не двоичным циклическим кодом, особенностью которого является эффективное исправление пакетных ошибок, когда несколько соседних битов

искажены. Кодовые слова получаются из любой разрешенной комбинации путем циклического сдвига ее разрядов. Кодирование и декодирование, обнаруживающее и исправляющее ошибки, просты в реализации, так как могут быть реализованы на базе регистров сдвига с обратной связью. В коде (204, 188) используются 16 проверочных битов.

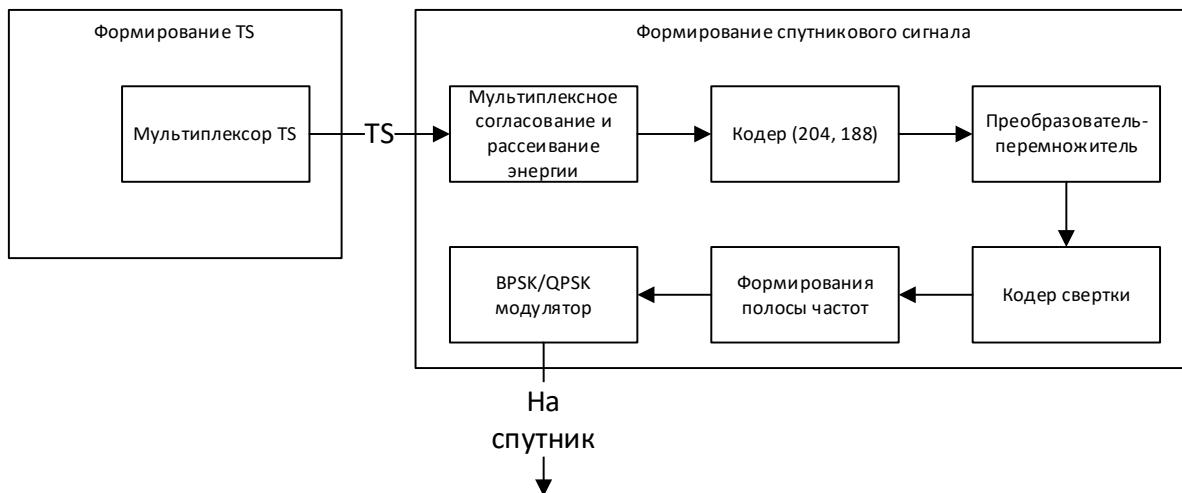


Рис. 2. Структурная схема по стандарту DVB-S

Выходной сигнал мог иметь Binary Phase Shift Keying (BPSK) [17] или Quadro Phase Shift Keying (QPSK) модуляции. BPSK модуляция является фазовой манипуляцией ФМн2, в которой точки сигнального созвездия расположены на расстоянии π . С помощью одного символа модуляции BPSK можно закодировать две комбинации. На рис. 3 изображено сигнальное созвездие BPSK сигнала.

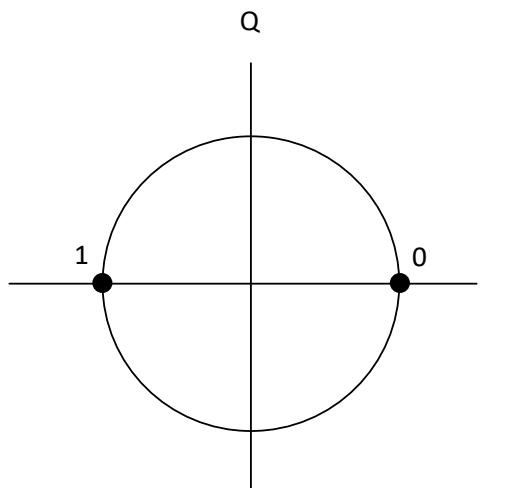


Рис. 3. Сигнальное созвездие BPSK сигнала

Манипуляция BPSK является наиболее помехоустойчивой фазовой манипуляцией, так как точки сигнального созвездия расположены на максимальном расстоянии друг от друга.

QPSK сигнал является фазовой манипуляцией ФМн4, в которой точки сигнального созвездия расположены на расстоянии $\pi/2$. С помощью одного символа QPSK модуляции можно закодировать четыре комбинации. На рис. 4 изображено сигнальное созвездие QPSK сигнала.

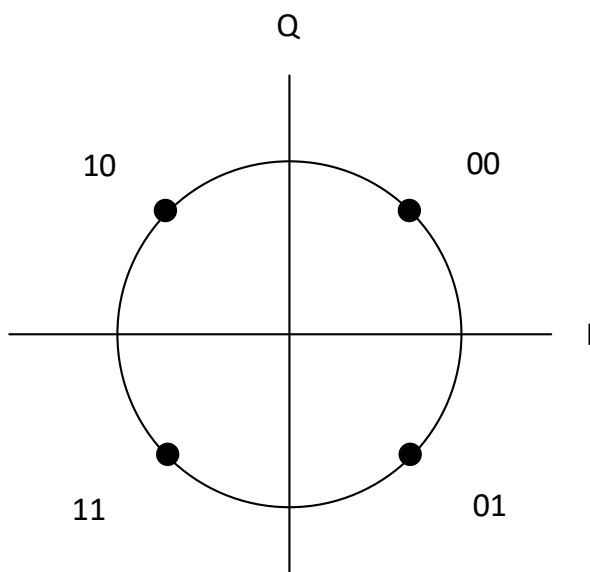


Рис. 4. Сигнальное созвездие QPSK сигнала

Следующим стандартом семейства DVB является DVB-Satellite 2nd generation (S2), разработанный в 2003 году и пришедший на замену стандарту DVB-S. На рис. 5 изображена упрощенная структурная схема системы по стандарту DVB-S2 [18].

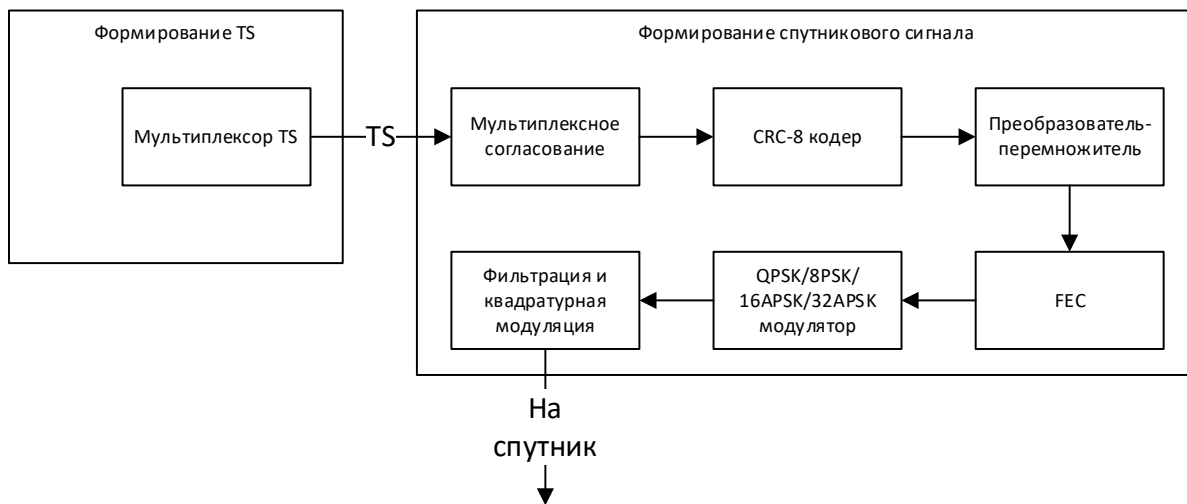


Рис. 5. Сигнальное созвездие QPSK сигнала

На рис. 5 левый блок «Формирование TS» повторяет схему рис. 1. Для сжатия информации могли использоваться стандарты MPEG-2 и MPEG-4.

В отличие от DVB-S в стандарте DVB-S2 используется Cyclic Redundancy Check (CRC) – 8. CRC-8 является циклическим избыточным кодом, алгоритм работы которого заключается в нахождении контрольной суммы, предназначенной для проверки целостности данных. Алгоритм CRC-8 базируется на свойствах деления с остатком двоичных многочленов. Расчет CRC-8, используемого в DVB-S2, осуществляется по выражению (1).

$$CRC = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1, \tag{1}$$

Использование CRC-8 является также помехоустойчивым кодированием, как и использование кода Рида-Соломона, упоминаемого в предыдущем стандарте DVB-S.

CRC также используется в современной автомобильной промышленности. Расчет CRC применяется для проверки правильности информационных битов сообщений в Controller Area Network (CAN) коммуникации. CAN коммуникация в ТС используется для передачи данных между блоками, подключенных к одной шине данных [19]. Несовпадение значения CRC и информационных битов сообщения помогает в определении некорректной работы блоков.

В стандарте DVB-S2 также используется Forward Error Correction (FEC). FEC – упреждающая коррекция ошибок, применяющаяся для исправления ошибок при передаче данных путем передаче избыточной служебной информации, на основе которой может быть восстановлена исходная информация. В DVB-S2 могут быть использованы следующие конфигурации FEC: 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10, где первая цифра означает, сколько передается полезной информации, а вторая цифра, сколько передается всего бит суммарной информации. Таким образом, 1/4 означает, что на один бит переданной полезной информации передается три контрольных бита [20].

ТВ сигнал стандарта DVB-S2 может быть модулирован QPSK, 8-Phase Shift Keying (PSK), 16-Amplitude and Phase Shift Keying (APSK) и 32-APSK. 8PSK является 3-битной фазовой манипуляцией. На рис. 6 представлено сигнальное созвездие модуляции 8PSK.

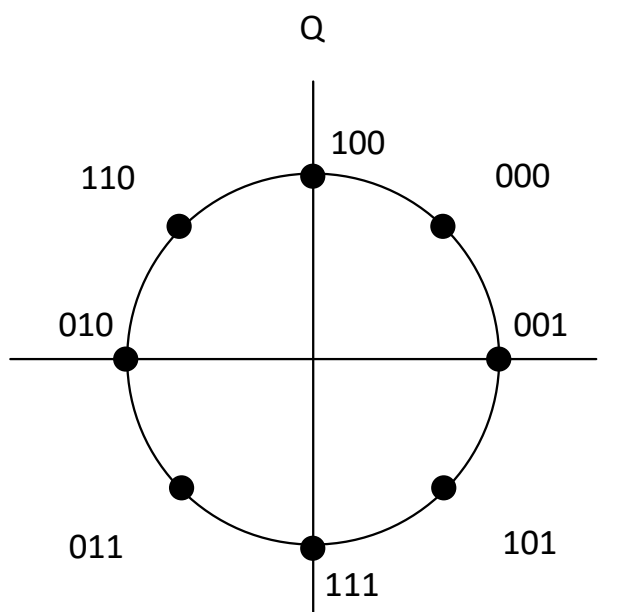


Рис. 6. Сигнальное созвездие сигнала 8PSK

За один символ модулированного сигнала передается три бита информации. Уменьшение фазового расстояния между точками сигнального созвездия уменьшает помехоустойчивость и вероятность ошибки в принятом сигнале, однако это компенсируется использованием CRC-8 и FEC различных конфигураций.

16APSK является амплитудно-фазовой манипуляцией, за один символ модулированного сигнала данной манипуляции передается четыре бита информации. На рис. 7 представлено сигнальное созвездие 16APSK.

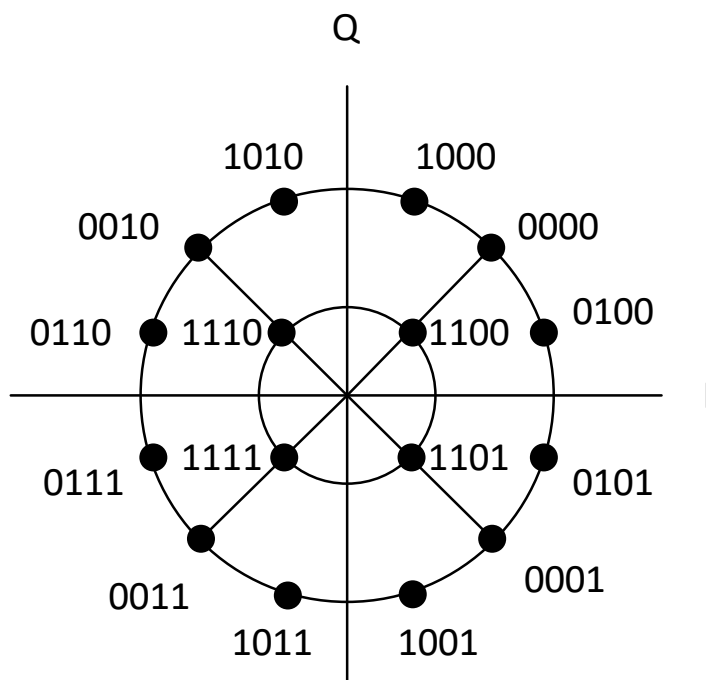


Рис. 7. Сигнальное созвездие сигнала 16APSK

Точки внешней окружности сигнального созвездия расположены на расстоянии $\pi/6$, точки внутренней окружности сигнального созвездия расположены на расстоянии $\pi/2$. Отношение радиусов окружностей сигнального созвездия определяется по выражению (2):

$$\gamma = R_2 / R_1, \tag{2}$$

где R_1 – радиус внутренней окружности, R_2 – радиус внешней окружности.

Оптимальные значения отношения радиусов определяется табличными значениям в зависимости от отношения числа информационных битов к общему числу битов в потоке (Code rate). В таблицу 2 сведены данные соотношения.

Таблица 2. Оптимальные отношения радиусов окружностей сигнального созвездия для 16APSK

Code rate	γ
2/3	3,15
3/4	2,85
4/5	2,75
5/6	2,7
8/9	2,6
9/10	2,57

32APSK является амплитудно-фазовой манипуляцией, за один символ модулированного сигнала данной манипуляции передается пять битов информации. На рис. 8 представлено сигнально созвездие 32APSK.

Точки внутренней окружность сигнального созвездия расположены на расстоянии $\pi/2$, точки средней окружности сигнального созвездия расположены на расстоянии $\pi/6$, точки внешней окружности сигнального созвездия расположены на расстоянии $\pi/8$. Для определения оптимальных значений отношений радиусов окружностей необходимо рассчитать два отношения, показанные в выражениях (3) и (4).

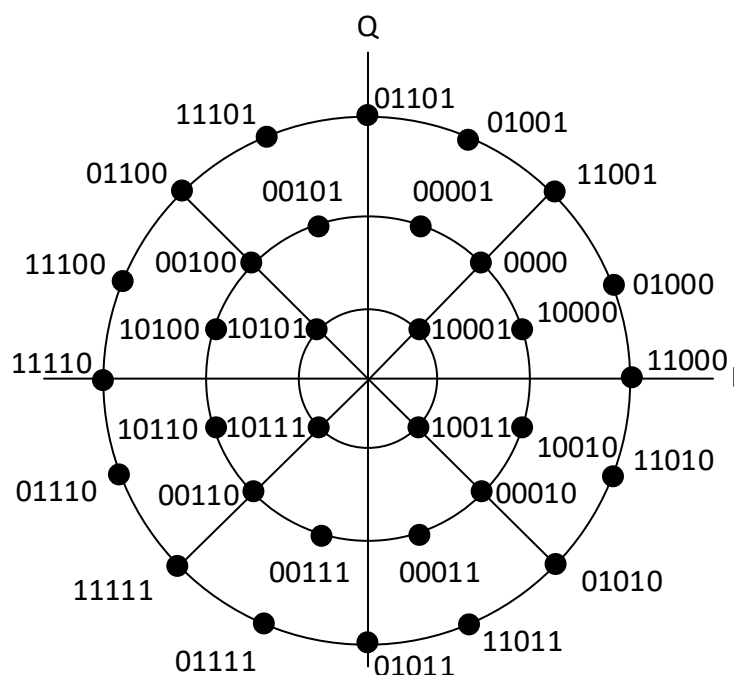


Рис. 8. Сигнальное созвездие сигнала 32APSK

$$\gamma_1 = R_2 / R_1, \tag{3}$$

$$\gamma_2 = R_3 / R_1, \tag{4}$$

где R_1 – радиус внутренней окружности, R_2 – радиус средней окружности, R_3 – радиус внешней окружности.

В таблицу 3 сведены значения оптимальных отношений радиусов окружностей в зависимости от Code rate.

Таблица 3. Оптимальные отношения радиусов окружностей сигнального созвездия для 32APSK

Code rate	γ_1	γ_2
3/4	2,84	5,27
4/5	3,99	4,87
5/6	2,64	4,64
8/9	2,54	4,33
9/10	2,53	4,30

Первый стандарт цифрового мобильного ТВ вещания семейства DVB является DVB-Handheld (H), принятый в 2004 году. DVB-H является стандартом мобильного ТВ вещания, использующий диапазон от 1452 МГц до 1492 МГц с полосой 5 МГц для вещания [21]. Для исправления ошибок в стандарте DVB-H используется протокол Multiprotocol Encapsulation (MPE)-FEC. MPE-FEC на момент появления DVB-H является нововведением для распознавания и предотвращения ошибок в приеме информации. Главным образом MPE-FEC сформировано как код Рида-Соломона (255, 191) [22]. Для передачи сигналов используется OFDM модуляция.

Следующим стандартом семейства DVB является DVB-Satellite Handheld (SH). DVB-SH принят в 2007 году. Данный стандарт цифрового ТВ вещания позволяет

передавать сигнал на мобильные устройства, такие как карманный персональный компьютер, мобильный телефон и портативный телевизор. DVB-SH основан на гибридной спутниковой/наземной передаче информации. Вещание производится на частотах до 3 ГГц, что позволяло использовать диапазон частот Ultra High Frequency (UHF) или по документации СССР – ультракороткий волновой диапазон. UHF соответствует частотам от 300 МГц до 3 ГГц. Сигналы в данном стандарте модулировались QPSK, 8PSK и 16APSK манипуляциями.

Первым стандартом цифрового кабельного ТВ вещания семейства DVB является DVB-Cable (C), выпущенный в 1994 году. На рис. 9 изображена структурная схема системы по стандарту DVB-C, где левый блок «Формирование TS» повторяет схему рис. 1. Для сжатия информации использовался стандарт MPEG-2.

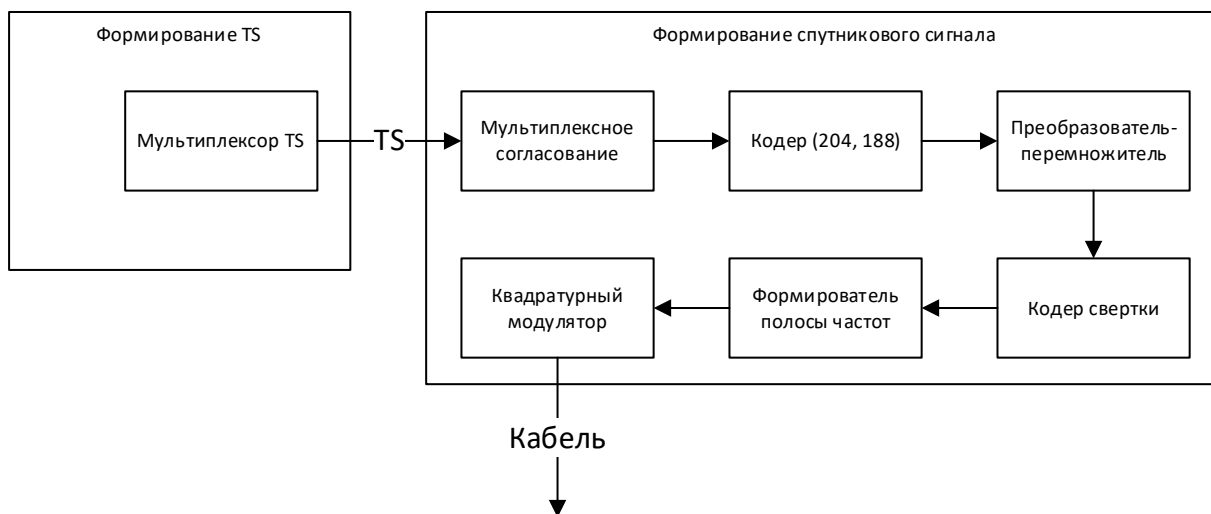


Рис. 9. Структурная схема системы по стандарту DVB-C

Кодирование сигнала происходит по коду Рида-Соломона (код (204, 188)), как в DVB-S. Передача сигнала происходит на частотах 47-862 МГц. Передаваемый сигнал мог быть модулирован 16-Quadrature Amplitude Modulation (QAM), 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM или 256-QAM [23]. Манипуляция QAM является квадратурной амплитудной модуляцией. На рис. 10 представлено сигнальное созвездие 16-QAM.

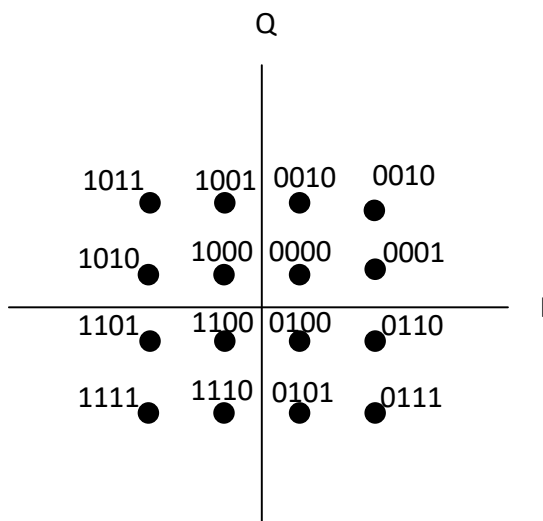


Рис. 10. Сигнальное созвездие 16-QAM сигнала

С помощью одного символа 16-QAM сигнала передается 4 бита информации. На рис. 11 изображено сигнальное созвездие 32-QAM.

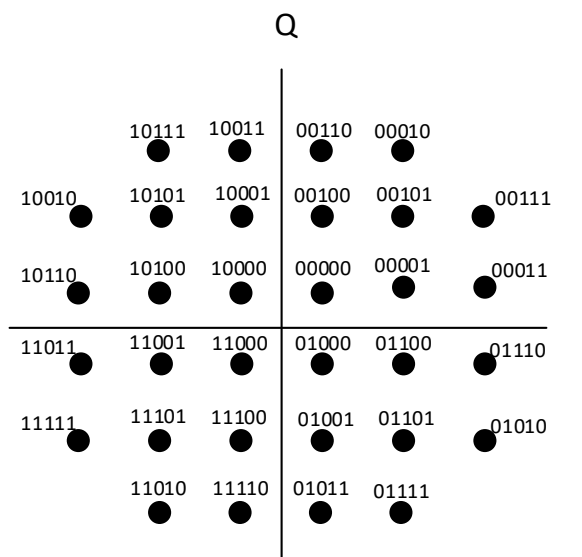


Рис. 11. Сигнальное созвездие 32-QAM сигнала

С помощью одного символа 32-QAM сигнала передается 5 битов информации. На рис. 12 изображено сигнальное созвездие 64-QAM.

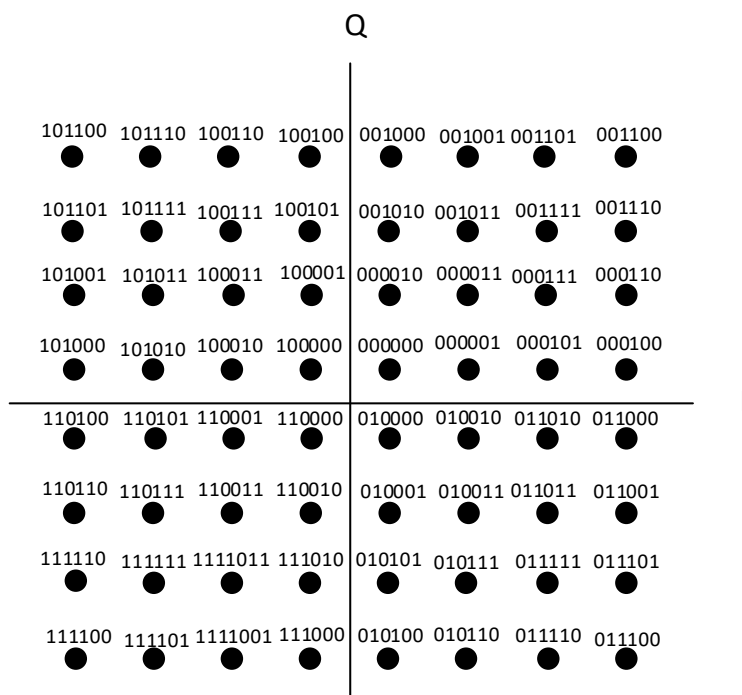


Рис. 12. Сигнальное созвездие 64-QAM сигнала

С помощью одного символа 64-QAM сигнала передается 6 битов информации.

Сигнальное созвездие для 128-QAM сведена в таблицу 4, где ячейки таблицы являются точками на сигнальном созвездии. С помощью одного символа 128-QAM сигнала передается 7 битов информации.

Таблица 4. Сигнальное созвездие для 128-QAM сигнала

		I = 1				I = 0			
Q = 0		1011101	1011111	1001111	1001101	0011010	0011011	0001011	0001010
		1011100	1011110	1001110	1001100	0011000	0011001	0001001	0001000
		1001010	1001000	1010100	1010110	1000110	1000100	0010000	0010001
		1001011	1001001	1010101	1010111	1000111	1000101	0010010	0010011
		1011011	1011001	1010001	1010011	1000011	1000001	0000010	0000011
		1011010	1011000	1010000	1010010	1000010	1000000	0000000	0000001
Q = 1		1101101	1101100	1100100	1100101	1100001	1100000	0100000	0100010
		1101111	1101110	1100110	1100111	1100011	1100010	0100011	0100011
		1111111	1111110	1110110	1110111	1110011	1110010	0100101	0100111
		1111101	1111100	1110100	1110101	1110001	1110000	0100100	0100110
				1101000	1101001	1111001	1111000	0101100	0101110
				1101010	1101011	1111011	1111010	0101101	0101111

Первый квадрант (в котором IQ = 00) сигнального созвездия для 256-QAM сведен в таблицу 5, где ячейки таблицы являются точками на сигнальном созвездии. Для восстановления остальных квадрантов необходимо поворачивать расположение точек сигнального созвездия на $\pi/2$ против часовой стрелки при перемещении к квадранту, в котором IQ = 10. Первые биты сообщения равны значению IQ в данном квадранте. С помощью одного символа 256-QAM сигнала передается 8 бит информации.

Таблица 5. Сигнальное созвездие для 256-QAM сигнала

		I = 1	I = 0						
Q = 0	Поворот на $\pi/2$	100000	10001	100101	100100	110100	110101	110001	110000
		100010	100011	100111	100110	110110	110111	110011	110010
		101010	101011	101111	101110	111110	111111	111011	111010
		101000	101001	101101	101100	111100	111101	111001	111000
		001000	001001	001101	001100	011100	011101	011001	011000
		001010	001011	001111	001110	011110	011111	011011	011010
		000010	000011	000111	000110	010110	010111	010011	010010
		000000	000001	000101	000100	010100	010101	010001	010000
Q = 1	Поворот на π	Поворот на $3\pi/2$							

Следующим стандартом семейства DVB является стандарт DVB-Cable 2nd generation (C2). Частота передачи информации осталась на тех же частотах, как для стандарта DVB-C, помехоустойчивое кодирование осуществляется, как в стандарте DVB-S2, от есть с помощью расчет различных CRC. Количество возможных модуляций также увеличена. Сигнал может быть модулирован манипуляциями COFDM, от 16-QAM до 4096-QAM. Для сжатия информации используется протокол MPEG-2 [24].

Первым стандарт цифрового эфирного ТВ вещания семейства DVB является DVB-Terrestrial (T), появившийся в 1997 году. Частота передачи информации составляет 47-862 МГц. Помехоустойчивое кодирование осуществлялось с помощью кода Рида-Соломона (204, 188), модуляция сигнала производилась манипуляциями QPSK, 16-QAM, 64-QAM и COFDM. Следующий стандарт эфирного ТВ вещания DVB-Terrestrial 2nd generation (T2), выпущенный в 2009 году, имел такие же отличия от предыдущего стандарта, как DVB-C от DVB-C2 и DVB-S и DVB-S2: модуляция сигнала производится манипуляциями от 16-QAM до 256-QAM, для помехоустойчивого кодирование осуществляется расчетом CRC.

В автомобильной промышленности телевизоры могут быть установлены в салоне ТС, в качестве системы развлечения пассажиров. Одним из первых автомобилей

премиального класса со штатно установленным телевизором был Mercedes-Benz S-класса W220 1998-2005 годов выпуска. Экраны телевизора устанавливались в спинки передних сидений. Из-за того, что модель автомобиля выпускалась еще во время активного использования аналоговых стандартов ТВ вещания, приемное устройство было рассчитано на стандарты PAL для европейского рынка и NTSC для рынка США.

После активного распространения цифровых стандартов ТВ вещания многие автопроизводители выпускали премиальные ТС со штатно установленным ТВ экраном. Одной из таких марок автомобилей является Skoda Superb B8, выпускающаяся с 2015 года. ТВ экран был интегрирован в мультимедийную систему, и показ передач блокировался при движении автомобиля в целях безопасности. Такая система поддерживала стандарты ТВ вещания DVB-T и DVB-T2. Также ТВ экраны штатно устанавливаются в автомобили Mercedes-Benz S-класса W223 текущего поколения, Audi A6, A7, A8 и Q7, поколения производства начиная с 2010 года. ТВ экран также интегрирован в систему мультимедиа. Транслирование ТВ передач может производиться на главном экране, установленном в центре и на экранах, установленных для пассажиров. Помимо стандартов DVB-T и DVB-T2 в качестве дополнительной опции может быть транслировано спутниковое ТВ вещание. Для реализации данной дополнительной функции используется стандарт DVB-S2.

Семейство стандартов ATSC. Семейство стандартов ATSC разработано Advanced Television Systems Committee для цифрового эфирного ТВ вещания. Для спутниковой передачи ТВ вещание используется стандарт DVB-S2. Стандарты ATSC делятся на три версии. Структурные схемы форматов DVB и ATSC схожи.

Первая версия стандартов ATSC 1.0 определял частотные диапазоны такие же, как для аналогового ТВ вещания от 55 МГц до 698 МГц. Однако, полоса, занимаемая каналом, отличается до DVB. Для стандартов DVB канал занимает полосу в 8 МГц, в то время как для ATSC на один канал выделена полоса 6 МГц. Для модуляции сигнала используется манипуляция 8-VSB. Помехоустойчивое кодирование осуществляется кодом Рида-Соломона (207, 187).

Следующая версия ATSC 2.0 является дополнением к ATSC 1.0, определяющим новые стандарты сжатия, а также возможность использовать соединение с интернетом в дополнение к основным эфирным сигналам. По стандарту ATSC 2.0 сжатие могло производиться по протоколам MPEG-2 и MPEG-4. Полоса используемых частот и модуляция сигнала не изменилась.

Последняя на настоящий момент версия ATSC 3.0 определяет новые способы модуляции сигнала: по ATSC 3.0 сигнал мог быть модулирован COFDM с использованием BPSK, QPSK, от 16-QAM до 4096-QAM. Для помехоустойчивого кодирования применяется расчет CRC. Диапазон частот и полоса частот, используемые для передачи не изменены [25].

Семейство стандартов ISDB. Семейство стандартов ISDB разработано японской ассоциацией радиопромышленников и бизнеса. Вещание по данным стандартам началось в 2000 году. Структурные схемы форматов ISDB и ATSC схожи.

Стандартом спутникового ТВ вещания является ISDB-S. Для вещания по данному стандарту используется 2-й и 3-й поддиапазоны «Ku» диапазона частот: от 11,7 ГГц до 12,75 ГГц. Сжатие данных производится по протоколу MPEG-2. Для помехоустойчивого кодирования используется код Рида-Соломона (204, 188). Модуляция сигнала осуществляется 8PSK, QPSK и BPSK.

Эфирное цифровое вещание осуществляется стандартом ISDB-T. Для вещания используется частотный диапазон 470-770 МГц с полосой 6 МГц для каждого канала.

Для сжатия данных используется протокол H.264. Исправление ошибок по стандарту осуществляется кодом Рида-Соломона (204, 188) и FEC. Сигнал модулируется OFDM, QPSK, 16-QAM и 64-QAM.

Кабельное цифровое ТВ вещание осуществляется стандартом ISDB-C, в котором используются частоты от 90 МГц до 770 МГц с полосой 6 МГц для канала. Сжатие данных производится протоколом MPEG-2, модуляция сигналов происходит 8PSK манипуляцией. Для предотвращения ошибок используется помехоустойчивое кодирование кодом Рида-Соломона (204, 188).

Мобильное цифровое ТВ вещание ISDB-Terrestrial Multi-Media (Tmm) основано на стандарте ISDB-T. Диапазон используемых частот: 1200-1500 МГц с полосой 6 МГц. Для модулирования сигнала используется та же модуляция, как для ISDB-T. Используется такое же помехоустойчивое кодирование и способ сжатия информация, как для ISDB-T [26].

Стандарт вещания DTMB. Ввиду малой распространенности стандарт DTMB используется только для цифрового эфирного вещания. Вещание происходит в диапазонах частоте 48,5-230 МГц и 470-862 МГц с полосой 8 МГц для одного канала. Модуляция сигнала осуществляется OFDM, от 4-QAM до 64-QAM. Для защиты от ошибок используется код Рид-Соломона (204, 188) и расчет CRC, что позволяет пользоваться данным стандартом в условиях исключительно слабого сигнала. Для сжатия информации используются протоколы MPEG-2 и MPEG-4 [27].

Выводы. Сравнение мировых стандартов цифрового ТВ вещания. В таблицу 6 сведены параметры спутникового цифрового ТВ вещания мировых стандартов.

Таблица 6. Параметры спутникового цифрового ТВ вещания

Стандарт	DVB-S2	ATSC 3.0	ISDB-S	DTMB
Сжатие	MPEG-2	-	MPEG-2	-
Помех. код.	CRC	-	(204, 188)	-
Модуляция	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK	-	8PSK, QPSK, BPSK	-
Частотный диапазон, ГГц	10,7-12,75	-	11,7-12,75	-

Стандарты ATSC и DTMB не регулируют спутниковое ТВ вещание. Стандарт DVB-S2 обладает преимуществом перед ISDB-S ввиду лучших алгоритмов помехоустойчивого кодирования и большего диапазона рабочих частот. Также именно DVB-S2 выбран для использования в ТС.

В таблицу 7 сведены параметры мобильного цифрового ТВ вещания мировых стандартов.

Таблица 7. Параметры мобильного цифрового ТВ вещания

Стандарт	DVB-H	ATSC 3.0	ISDB-Tmm	DTMB
Сжатие	MPEG-2	-	MPEG-4	-
Помех. код.	(255, 191)	-	(204, 188)	-
Модуляция	QPSK, 8PSK, 16APSK	-	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	-
Частотный диапазон, МГц	1452-1492	-	1200-1500	-
Полоса частот для одного канала, МГц	5	-	6	-

Стандарты ATSC и DTMB не регулируют мобильное ТВ вещание. Стандарт ISDB-Tmm обладает преимуществом перед DVB-H ввиду использования лучшего протокола сжатия данных и большего диапазона рабочих частот.

В таблицу 8 сведены параметры кабельного цифрового ТВ вещания мировых стандартов.

Таблица 8. Параметры кабельного цифрового ТВ вещания

Стандарт	DVB-C2	ATSC 3.0	ISDB-C	DTMB
Сжатие	MPEG-2	-	MPEG-2	-
Помех. код.	CRC	-	(204, 188)	-
Модуляция	От 16-QAM до 4096-QAM	-	8PSK	-
Частотный диапазон, МГц	47-862	-	90-770	-
Полоса частот для одного канала, МГц	8	-	6	-

Стандарт DVB-C2 обладает преимуществом перед ISDB-C ввиду использования лучших алгоритмов для помехоустойчивого кодирования, большего диапазона рабочих частот и большей полосы, выделенной под один канал.

В таблицу 9 сведены параметры эфирного цифрового ТВ вещания мировых стандартов.

Таблица 9. Параметры эфирного цифрового ТВ вещания

Стандарт	DVB-T2	ATSC 3.0	ISDB-T	DTMB
Сжатие	MPEG-4	MPEG-2, MPEG-4	MPEG-4	MPEG-2, MPEG-4
Помех. код.	CRC	(207, 187)	(204, 188)	(204, 188), CRC
Модуляция	От 16-QAM до 256-QAM	BPSK, QPSK, от 16-QAM до 4096-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	От 4-QAM до 64-QAM
Частотный диапазон, МГц	47-862	55-698	470-770	48,5-230, 470-862
Полоса частот для одного канала, МГц	8	6	6	8

Стандарт ATSC обладает большим количеством возможных модуляций сигнала по сравнению с другими стандартами, однако лучшим помехоустойчивым кодированием обладает DTMB. Но стандарт DTMB используется только на территории Китая и Пакистана, в то время как большая часть стран мира использует стандарт DVB. Также именно DVB-T и DVB-T2 выбраны для использования в ТС.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

APSK	Amplitude and Phase Shift Keying
ATSC	Advanced Television System Committee
BPSK/ФМн2	Binary Phase Shift Keying/Фазовая манипуляция-2
C	Cable
C2	Cable 2 nd generation
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CRC	Cyclic Redundancy Check
DTMB	Digital Terrestrial Multimedia Broadcast
DVB	Digital Video Broadcasting
FEC	Forward Error Correction
H	Handheld
HD	High Definition
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting

MPE	Multiprotocol Encapsulation
MPEG	Moving Picture Experts Group
NTSC	National Television System Committee
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAL	Phase Alternating Line
PAT	Program Association Table
PID	Packet Identifier
PMT	Program Map Table
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK/ФМн4	Quadro Phase Shift Keying/Фазовая манипуляция-4
S	Satellite service
S2	Satellite 2 nd generation
SECAM	Séquentiel couleur à mémoire
SH	Satellite Handheld
T	Terrestrial
T2	Terrestrial 2nd generation
Tmm	Terrestrial Multi-Media
TS	Transport Stream
UHF	Ultra High Frequency
VSB	Vestigial Side Band
АЦП	Аналогово-цифровое преобразование
Помех. код.	Помехоустойчивое кодирование
ТВ	Телевизионный
ТС	Транспортное средство

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Одинец, А. И. Перспективы внедрения цифрового телевидения / А. И. Одинец, А. Н. Бурдин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – №4. – С. 49-52.
2. Климов, Д. А. Особенности и перспективы развития цифрового телевидения. Стандарты вещания (часть 1) / Д. А. Климов // Т-Сomm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2012. – №6. – С. 32-35.
3. Кузовкова, Т. А. Оценка международного опыта внедрения цифрового телевидения и проблемы его реализации в России / Т. А. Кузовкова, М. О. Котлер // Т-Сomm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – №12. – С. 64-66.
4. Ким, Р. Проблемы и пути внедрения системы цифрового телерадиовещания в Республике Казахстан / Р. Ким, Ю. Бутузов, С. Батюк // Информационные телекоммуникационные сети. – 2007. – №1. – С 64-66.
5. Овсепян, Р. Н. Отечественное телевидение: история для изучения / Р. Н. Овсепян // Вестник Московского университета. Серия 10. Журналистика. – 2012. – №1. – С. 150-163.
6. Красильников, Н. Н. От аналогового телевидения к цифровым видеосистемам и видеокomпьютерным технологиям / Н. Н. Красильников, Б. С. Тимофеев // Информационно-управляющие системы. – 2006. – №3. – С. 2-4.
7. Хромой, Б. П. История непрерывной модуляции / Б. П. Хромой // Т-Сomm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2018. – Т. 12, №2. – С. 70-75.
8. Ястребов, Л. Д. Анализ современных стандартов сжатия изображений / Л. Д. Ястребов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2013. – С. 164-169.
9. История развития форматов видеосжатия [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/intel/articles/133198/> (дата обращения 27.09.2025).
10. Маликова, Ж. Б. Принцип сжатия сигнала с H.264/MPEG-4 / Ж. Б. Маликова // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – С. 21-23.
11. Кучмин, Н. А. Квантователи речевого сигнала / Н. А. Кучмин, О. Р. Никитин // The Scientific Heritage. – 2021. – № 81. – С. 46-50.
12. ГОСТ Р 54458-2011. Транспортирование аудио- и видеослужб с алгоритмом компрессии MPEG-4 (H.264/ADV) по цифровым системам передачи: дата введения 2012-12-01 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095108> (дата обращения 27.09.2025).

13. Курносенков, И. Н. Анализ современных стандартов сжатия видеоданных / И.Н. Курносенков, А. Ю. Тропченко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – С. 17-21.
14. ГОСТ Р 59804-2021 Телевидение вещательное цифровое. Технические требования DVB для вещания данных: дата введения 2022-06-01 [Электронный ресурс]. – URL: <https://meganorm.ru/Data/778/77882.pdf> (дата обращения 27.09.2025).
15. Колесов, А. К. Кодирование телевизионных изображений в мобильной стереовидеосистеме / А. К. Колесов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2008. – №6. – С. 12-20.
16. EN 300 421 v1.1.2 Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services: дата введения 1994-08-15 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300421/01.01.02_60/en_300421v010102p.pdf (дата обращения 28.09.2025).
17. TR 101 198 v1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation of Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation in DVB satellite transmission system: дата введения 1997-09 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101100_101199/101198/01.01.01_60/tr_101198v010101p.pdf (дата обращения 28.09.2025).
18. ETSI EN 302 307 v1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2): дата введения 2009-04 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.02.01_40/en_302307v010201o.pdf (дата обращения 28.09.2025).
19. Завойкин, В. А. Реализация отечественной системы расширенной диагностики колесных транспортных средств по UDS протоколу в шине данных CAN / В. А. Завойкин // Труды НАМИ. – 2022. – №3. – С. 6-16.
20. Pham, K. H. Fading countermeasure for high frequency data communications using errors correcting codes / К. Н. Pham, X. Н. Dang, S. Н. Vu // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2009. – №5. – С. 24-29.
21. ETSI EN 302 304 v1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H): дата введения 2004-11 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302304/01.01.01_60/en_302304v010101p.pdf (дата обращения 28.09.2025).
22. Спиридонов, В. М. Телевидение прямого эфира для мобильных терминалов: стандарт DVB-H / В. М. Спиридонов, А. В. Петраков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2006. – Т. 2, №3. – С. 63-65.
23. EN 300 428 v1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems: дата введения 04-1998 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300429/01.02.01_60/en_300429v010201p.pdf (дата обращения 28.09.2025).
24. DVB Document A138 Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital transmission system for cable systems (DVB-C2): дата введения 2015-03 [Электронный ресурс]. – URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a138_dvb-c2_spec.pdf (дата обращения 28.09.2025).
25. ATSC Standard: A/300:2024-04, ATSC 3.0 System: дата введения 2024-04-03 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.atsc.org/wp-content/uploads/2024/04/A300-2024-04-ATSC-3-System-Standard.pdf> (дата обращения 28.09.2025).
26. ARIB STD-B31 Version 2.2 Transmission system for digital terrestrial television broadcasting: дата введения 18.03.2014 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/6-STD-B31v2_2-E1.pdf (дата обращения 09.10.2025).
27. Dai, L. Next-generation digital television terrestrial broadcasting systems: key technologies and research trends / L. Dai, Z. Wang, Z. Yang // Topics in consumer communications and networking. – 2012. – С. 150-158.

REFERENCES LIST

1. Odinets, A. I. Perspektivy vnedreniia tsifrovogo televideniia / A. I. Odinets, A. N. Burdin // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. – 2014. – №4. – С. 49-52.
2. Klimov, D. A. Osobennosti i perspektivy razvitiia tsifrovogo televideniia. Standarty veshchaniia (chast 1) / D. A. Klimov // T-Comm – Telekommunikatsii i Transport. – 2012. – №6. – С. 32-35.

3. Kuzovkova, T. A. Otsenka mezhdunarodnogo opyta vnedreniia tsifrovogo televideniia i problemy ego realizatsii v Rossii / T. A. Kuzovkova, M. O. Kotler // T-Comm – Telekommunikatsii i Transport. – 2013. – №12. – S. 64-66.
4. Kim, R. Problemy i puti vnedreniia sistemy tsifrovogo teleradioveshchaniia v Respublike Kazakhstan / R. Kim, Iu. Butuzov, S. Batiuk // Informatsionnye telekommunikatsionnye seti. – 2007. – №1. – S. 64-66.
5. Ovsepiian, R. N. Otechestvennoe televidenie: istoriia dlia izucheniia / R. N. Ovsepiian // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 10. Zhurnalistika. – 2012. – №1. – S. 150-163.
6. Krasilnikov, N. N. Ot analogovogo televideniia k tsifrovym videosistemam i videokompiuternym tekhnologiam / N. N. Krasilnikov, B. S. Timofeev // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy. – 2006. – №3. – S. 2-4.
7. Khromoi, B. P. Istoriia nepreryvnoi moduliatsii / B. P. Khromoi // T-Comm – Telekommunikatsii i Transport. – 2018. – T. 12, №2. – S. 70-75.
8. Iastrebov, L. D. Analiz sovremennykh standartov szhatiia izobrazhenii / L. D. Iastrebov // Fundamentalnye i prikladnye issledovaniia: problemy i rezultaty. – 2013. – S. 164-169.
9. Istoriia razvitiia formatov videoszhatiia [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/intel/articles/133198/> (data obrashcheniia 27.09.2025).
10. Malikova, Zh. B. Printsip szhatiia signala s H.264/MPEG-4 / Zh. B. Malikova // Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniia. – 2016. – S. 21-23.
11. Kuchmin, N. A. Kvantovateli rechevogo signala / N. A. Kuchmin, O. R. Nikitin // The Scientific Heritage. – 2021. – № 81. – S. 46-50.
12. GOST R 54458-2011. Transportirovanie audio- i videosluzhb s algoritmom kompressii MPEG-4 (H.264/ADV) po tsifrovym sistemam peredachi: data vvedeniia 2012-12-01 [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095108> (data obrashcheniia 27.09.2025).
13. Kurnosenkov, I. N. Analiz sovremennykh standartov szhatiia videodannykh / I.N. Kurnosenkov, A. Iu. Tropchenko // Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki. – 2006. – S. 17-21.
14. GOST R 59804-2021 Televidenie veshchatelnoe tsifrovoe. Tekhnicheskie trebovaniia DVB dlia veshchaniia dannykh: data vvedeniia 2022-06-01 [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://meganorm.ru/Data/778/77882.pdf> (data obrashcheniia 27.09.2025).
15. Kolesov, A. K. Kodirovanie televizionnykh izobrazhenii v mobilnoi stereovideosisteme / A. K. Kolesov // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika. – 2008. – №6. – S. 12-20.
16. EN 300 421 v1.1.2 Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services: data vvedeniia 1994-08-15 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300421/01.01.02_60/en_300421v010102p.pdf (data obrashcheniia 28.09.2025).
17. TR 101 198 v1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation of Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation in DVB satellite transmission system: data vvedeniia 1997-09 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101100_101199/101198/01.01.01_60/tr_101198v010101p.pdf (data obrashcheniia 28.09.2025).
18. ETSI EN 302 307 v1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2): data vvedeniia 2009-04 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.02.01_40/en_302307v010201o.pdf (data obrashcheniia 28.09.2025).
19. Zavoikin, V. A. Realizatsiia otechestvennoi sistemy rasshirennoi diagnostiki kolesnykh transportnykh sredstv po UDS protokolu v shine dannykh CAN / V. A. Zavoikin // Trudy NAMI. – 2022. – №3. – S. 6-16.
20. Pham, K. H. Fading countermeasure for high frequency data communications using errors correcting codes / K. H. Pham, X. H. Dang, S. H. Vu // Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki. – 2009. – №5. – S. 24-29.
21. ETSI EN 302 304 v1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H): data vvedeniia 2004-11 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302304/01.01.01_60/en_302304v010101p.pdf (data obrashcheniia 28.09.2025).
22. Spiridonov, V. M. Televidenie priamogo efira dlia mobilnykh terminalov: standart DVB-H / V. M. Spiridonov, A. V. Petrakov // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. – 2006. – T. 2, №3. – S. 63-65.

23. EN 300 428 v1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems: data vvedeniia 04-1998 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300429/01.02.01_60/en_300429v010201p.pdf (data obrashcheniia 28.09.2025).
24. DVB Document A138 Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital transmission system for cable systems (DVB-C2): data vvedeniia 2015-03 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a138_dvb-c2_spec.pdf (data obrashcheniia 28.09.2025).
25. ATSC Standard: A/300:2024-04, ATSC 3.0 System: data vvedeniia 2024-04-03 [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.atsc.org/wp-content/uploads/2024/04/A300-2024-04-ATSC-3-System-Standard.pdf> (data obrashcheniia 28.09.2025).
26. ARIB STD-B31 Version 2.2 Transmission system for digital terrestrial television broadcasting: data vvedeniia 18.03.2014 [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/6-STD-B31v2_2-E1.pdf (data obrashcheniia 09.10.2025).
27. Dai, L. Next-generation digital television terrestrial broadcasting systems: key technologies and research trends / L. Dai, Z. Wang, Z. Yang // Topics in consumer communications and networking. – 2012. – S. 150-158.

Поступила в редакцию 26.10.2025 г., рекомендована к изданию 16.01.2026 г.

ANALYSIS OF MODERN DIGITAL TELEVISION BROADCASTING STANDARDS

Zakharov P.K., Torina E.M., Rogov P.S., Lepeeva I.B., Slepov A.S.

This paper presents the history of the development of global television broadcasting, a description of digital television standards used in the world, their most important characteristics, a description of compression protocols, noise-resistant coding, and examples of applications in the automotive industry.

Keywords: digital TV broadcasting standards, information compression protocols, noise-resistant coding, phase, amplitude, amplitude-phase signal manipulation, signal constellation.

Захаров Павел Константинович

инженер 3 категории сектора функциональной безопасности программного обеспечения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: pavel.zaharov@nami.ru

Zakharov Pavel Konstantinovich

Engineer of the 3rd category at Functional Safety Software Sector of SSC RF FSUE NAMI,
Russian Federation, Moscow.
ORCID: 0009-0006-6372-8295

Торина Елена Михайловна

кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: drozdovaym@mpei.ru

Torina Elena Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.
ORCID: 0000-0002-4716-2969

Рогов Петр Сергеевич

кандидат технических наук, начальник сектора функциональной безопасности программного обеспечения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: petr.gorov@nami.ru

Rogov Petr Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Head of Functional Safety Software Sector of SSC RF FSUE NAMI,
Russian Federation, Moscow.
ORCID: 0000-0001-9758-7554

Лепеева Ирина Борисовна

главный специалист сектора функциональной безопасности программного обеспечения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: irina.lepeeva@nami.ru

Lepeeva Irina Borisovna

Chief Specialist at Functional Safety Software Sector of SSC RF FSUE NAMI,
Russian Federation, Moscow.
ORCID: 0009-0006-7819-2702

Слепов Александр Сергеевич

инженер кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: slepovas@mpei.ru

Slepov Aleksandr Sergeevich

Engineer at Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.
ORCID: 0009-0001-0447-16736

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

© 2026 Зуев В.М., Первенко Д.А., Ниценко А.В.

В данной работе приведены описания стабилизации положения колесного прыгающего робота методом линейно-квадратичного регулирования. Показано, что метод линейно-квадратичного регулирования можно модифицировать так, что он будет самонастраивающимся на заданное целевое положение. Это делает возможным стабилизацию положения в более широком диапазоне воздействий, более устойчивой к внешним факторам и не требует, в отличие от пропорционально-интегрально-дифференцирующего метода, перенастройки робота в процессе изменения параметров системы.

Ключевые слова: робот, прыгающий, колесный, стабилизация.

Введение. В настоящее время становятся популярными колесные прыгающие роботы [1-5]. В сравнении с другими они имеют минимальные затраты на перемещение. Одной из проблем таких роботов является стабилизация его равновесия. В статье [6] рассматривались основные методы кинематики и динамики колесного прыгающего робота. В настоящей статье предлагается более устойчивая версия метода стабилизации линейно-квадратичного регулирования.

Механизм стабилизации. Цель: стабилизировать вертикальное положение робота, точнее: стержня, на котором расположены все исполнительные механизмы. Технически проблема решается, если установить управляемый двигатель на малой шестерне [6], который может прикладывать момент между шестерней и стержнем. На при этом связи становятся более сложными. Настоящая статья раскрывает проблему и предлагает свой вариант решения.

Кинематическая система колесного прыгающего робота изображена на рис. 1. Принципиальным отличием от робота [6] является то, что здесь добавлен полезный груз С, закреплённый на длинной штанге $L=BC$.

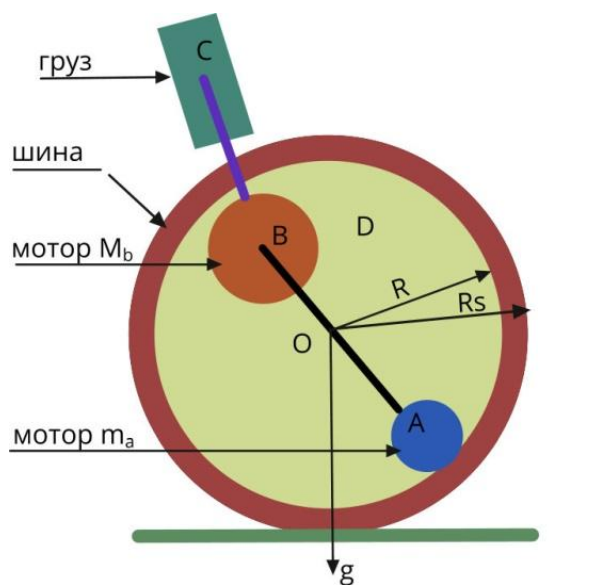


Рис. 1. Кинематическая система колесного прыгающего робота

В [7] это штанга представляет собой пятизвенный манипулятор. Из-за этого, вес и момент инерции системы в процессе работы могут изменяться в широких пределах. В точке В размещен двигатель M_b , в задачи которого входят стабилизация положения всей системы, подъем-опускание центра тяжести и осуществление прыжков. Штанга L жестко закреплена на статоре двигателя M_b . Рычаг AB концом В жестко соединен с ротором двигателя M_b , а концом А жестко соединен со статором двигателя m_a , основной задачей которого является качение устройства по земле. Момент двигателя m_a передается шине колеса через зубчатое колесо А на внутренний зубчатый обод шины. В отличие от [6] мы разрываем связь: стержень AB и шестерня соединены через управляемый привод (мотор). Обновлённая физическая модель такова: θ - угол положения центра малой шестерни относительно центра желоба, φ - угол поворота малой шестерни, ψ - угол стержня с грузом относительно горизонтали (инерциальная система).

Важно, что формула связи (1), полученная в [6], остаётся справедливой и в этом случае:

$$x = (R - r)\theta - r\varphi. \quad (1)$$

Но теперь нет жёсткой связи между φ и ψ , так как между ними – двигатель, который может создавать управляющий момент $\tau(t)$.

Целью является стабилизация стержня, удерживающего полезную массу, в любом заданном положении. Но, не уменьшая общности, достаточно показать стабилизацию в вертикальном положении $\psi = \pi/2$ (от горизонтали). Это положение неустойчивого равновесия, как перевёрнутый маятник [7-9].

Для возможности стабилизации равновесия (перевёрнутого маятника), необходимы: двигатель, способный прикладывать нужный момент; датчики для измерения (θ φ $\dot{\theta}$ $\dot{\varphi}$) и т. д.) и реализован закон управления (например, пропорционально-интегрально-дифференцирующем (ПИД) или пропорционально-интегрально-дифференцирующем (ЛКР) регуляторе). Фактически, двигатель даёт внутреннюю степень свободы управления, которой достаточно для стабилизации.

Доказать, что такая система может [10-11] обеспечить нужную стабилизацию положения достаточно просто. Надо рассчитать прямой момент на стержень (упрощённо). Если считать, что двигатель прикладывает момент $\tau(t)$ к стержню, то уравнение для ψ будет:

$$I_{eff}\ddot{\psi} - mgL\cos\psi = \tau,$$

где I_{eff} – эффективный момент инерции (включая связь с движением колеса).

Для малых отклонений от вертикали δ вверх: $\psi = \frac{\pi}{2} + \delta$, $\cos\psi \approx -\delta$, тогда:

$$I_{eff}\ddot{\delta} + mgL\delta = \tau.$$

Это неустойчивая система (знак «+»), но с управлением ПИД $\tau = -k_p\delta - k_d\dot{\delta}$ получаем:

$$I_{\text{eff}} \ddot{\delta} + k_d \dot{\delta} + (k_p - mgL) \delta = \tau.$$

Если выбрать $k_p > mgL$, система становится асимптотически устойчивой.

Но гораздо интереснее рассмотреть полную нелинейную модель с ЛКР и обратной связью по причине того, что именно такая модель имеет преимущество перед остальными известными. Линеаризуем систему около $\psi = \frac{\pi}{2}$, $\theta = 0$, $\dot{\psi} = \dot{\theta} = 0$.

Получим линейную систему типа: $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$, где $u = \tau$.

Получим уравнение движения и уравнение стабилизации из уравнений Лагранжа. Для этого надо найти кинетическую и потенциальную энергию груза. Положение груза:

$$\begin{cases} X = x + (R - r \sin \theta + L \cos \psi) \\ Y = -(R - r) \cos \theta + L \sin \psi \end{cases}.$$

Скорость груза:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \dot{x} + (R - r) \dot{\theta} \cos \theta - L \dot{\psi} \sin \psi, \\ \dot{Y} &= (R - r) \dot{\theta} \sin \theta + L \dot{\psi} \cos \psi. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия колеса: $T_{\text{к}} = M \dot{x}^2$, где $\dot{x} = (R - r) \dot{\theta} - r \dot{\varphi}$. Теперь кинетическая и потенциальные энергии вращающихся шестерен вращающиеся части: малая шестерня (массой пренебрегаем, но учитываем её инерцию через φ , фактически, если масса мала, можно считать, что двигатель напрямую управляет ψ , а φ определяется из связи с x . Главное упрощение: считаем массу и инерцию малой шестерни пренебрежимо малы. Тогда уравнение для φ исчезает и связь $x = (R - r) \theta - r \varphi$ позволяет всё выразить через φ , но если шестерня невесома, то момент τ напрямую управляет стержнем, а реакция передаётся через зубчатое зацепление на колесо. В этом приближении система имеет две обобщённые координаты: θ и ψ , и один управляющий вход τ . Это корректно, если двигатель установлен на оси шестерни, и шестерня есть просто передаточный элемент.

Получим уравнения движения с управлением. За обобщённые координаты принимаем: $q_1 = \theta$, $q_2 = \psi$. Лагранжиан системы:

$$L = M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) - U.$$

В уравнение Лагранжа необходимо добавить обобщённые силы: для θ $Q_\theta = 0$ (так как нет активного управления), для ψ $Q_\psi = \tau$ (имеется управляющий момент).

После простых, но громоздких вычислений получаем систему:

$$\mathbf{M}(\theta, \psi) \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{h}(\theta, \psi, \dot{\theta}, \dot{\psi}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \mathbf{G}(\theta, \psi),$$

где \mathbf{G} учитывает гравитацию:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -mg(R-r)\sin\theta \\ mgL\cos\psi \end{bmatrix}.$$

Линеаризация около точки желаемой стабилизации $\psi = \frac{\pi}{2}$, $\theta = 0$. Пусть: $\psi = \frac{\pi}{2} + \delta$, $\delta \ll 1$ является отклонением от вертикали вверх, $\theta \ll 1$, $\dot{\theta} \ll 1$, $\dot{\delta} \ll 1$. Тогда: $\cos\psi \approx -\delta$, $\sin\psi \approx 1$, $\sin\theta \approx 0$, $\cos\theta \approx 1$

После линеаризации (подробности опускаем для краткости) получаем:

$$A_{11}\ddot{\theta} + A_{12}\ddot{\delta} = -mg(R-r)\theta;$$

$$A_{21}\ddot{\theta} + A_{22}\ddot{\delta} = -mgL\delta + \tau,$$

где коэффициенты A_{ij} - константы (зависят только от M, m, R, r, L).

Это линейная система вида:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{B}\tau. \quad (2)$$

Как известно [12-15], метод линейно-квадратичного регулирования (ЛКР) — это оптимальный метод синтеза линейного регулятора с обратной связью, который минимизирует заданный квадратичный критерий качества, балансируя между отклонением от цели (например, углами) и затратами управления (момент, энергия двигателя). В сравнении с пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором [6] имеет автоматическую настройку через матрицы \mathbf{Q} , \mathbf{R} , достигает оптимальности минимизируя заданный функционал, естественно работает с векторами, учитывает полную динамику системы, имеет хорошую робастность при правильном выборе \mathbf{Q} , \mathbf{R} . То-есть даёт наилучший (в смысле заданного критерия) линейный закон управления для линейной системы.

Для линейной системы:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u. \quad (3)$$

ЛКР находит управление:

$$u = -\mathbf{K}\mathbf{x}, \quad (4)$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}$, а \mathbf{P} - решение уравнения Риккати:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}. \quad (5)$$

В (5):

- $\mathbf{Q} \gg 0$ - веса на состояния (насколько важно их минимизировать),
- $\mathbf{R} > 0$ - вес на управление (насколько «дорого» использовать u).

В нашем случае вектор состояния:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ \delta \\ \dot{\theta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad u = \tau. \quad (6)$$

Цель: $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{0}$. Из полной нелинейной модели (8) после линеаризации получаем:

$$\ddot{\theta} = a_{11}\theta + a_{12}\delta + b_1\tau. \quad (7)$$

$$\ddot{\delta} = a_{21}\theta + a_{22}\delta + b_2\tau. \quad (8)$$

Перепишем в форме пространства состояний:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u. \quad (9)$$

В реальной робототехнической системе параметры (M, m, R, r, L, g) известны из конструкции, вектор \mathbf{x} известен от датчиков (акселерометр, гироскоп и т. п.) Коэффициенты a_{ij} , b_i зависят от параметров (M, m, R, r, L, g) . Их можно вычислить аналитически и, если механическая конфигурация робота не претерпевает существенных изменений в процессе его работы, то это хорошее решение. В противном случае надо иметь набор коэффициентов для каждой конфигурации или иметь датчики положения всех деталей робота и на основании этого пересчитывать модель в ходе работы. Здесь предлагается создавать искусственный тестирующий импульс, воздействующий на систему и по импульсной переходной характеристике получить коэффициенты a_{ij} , b_i или численно через частные производные. Тестирующий импульс должен быть достаточно мал, чтобы он не влиял на траекторию движения робота, но достаточен для обнаружения реакции акселерометрами и угломерами.

Уравнения (2-9) дают основу для задачи синтеза ЛКР-регулятора [16, 17], но в них скрыто несколько фундаментальных математических и физических проблем, которые могут привести к тому, что система будет вести себя не так, как ожидается (например, стабилизировать "висячий" маятник вместо перевернутого, или работать только в симуляции, но не на реальном объекте). Физическая реальность такова, что вектор $\mathbf{B}\tau$ в (11) должен иметь отрицательный знак. Иначе система будет всегда находиться в устойчивом равновесии. Это вытекает из того, что стандартная форма уравнений Лагранжа II рода имеет вид (10):

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \nabla V(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (10)$$

где $V(\mathbf{q})$ - потенциальная энергия. Отсюда ускорение $\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \nabla V)$ и видно, что должен быть отрицательный знак.

Вектор управления \mathbf{Q} может иметь вид:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В первом случае управляющий момент τ прикладывается непосредственно к координате ψ (стержню). Во втором случае мотор крутит колесо (θ), а стержень (ψ) пассивен. Управление осуществляется за счет инерционной связи. Это соответствует в классической задаче "перевернутый маятник на тележке/колесе", где система

недоактивируема. В нашем случае, так как момент τ действует напрямую на ψ , система является полностью активируемой по отношению к задаче стабилизации угла ψ . ЛКР конечно здесь избыточен, хватило бы простого PD-регулятора, если бы не стояла цель устойчивости при изменении конфигурации системы.

На рисунках 2, 3 приведены результаты моделирования в системе MATLAB.

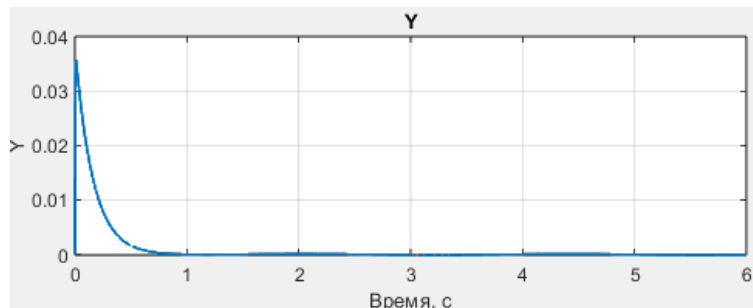


Рис. 2. Положение груза Y

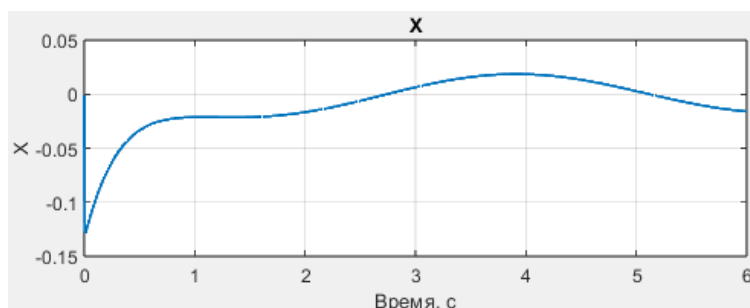


Рис. 3. Положение груза X

Выводы. Полученные уравнения могут быть загружены непосредственно в микропроцессорную систему робота через средства MATLAB. Они показывают устойчивую динамику при значительном изменении конфигурации робота в процессе его работы. ЛКР автоматически находит оптимальные коэффициенты обратной связи, учитывая полную динамику системы, что делает его гораздо мощнее ПИД-регуляторов многомерных задач. Достаточно удовлетворительно управляет системой с нелинейной динамикой (то есть ЛКР применяется как нелинейный регулятор с линейной обратной связью).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Design and dynamic analysis of jumping wheel legged robot in complex terrain environment / T. Guo [et al.] // *Frontiers in neurorobotics*. – 2022. – V. 16. – P. 1066714. – DOI 10.3389/fnbot.2022.1066714.
2. Wu, K. Research on motion control method of biped wheeled robot on complex terrain environment: master's thesis / K. Wu. – Jinan, Shandong University, 2020. – DOI 10.27272/d.cnki.gshdu.2020.005315.
3. Research on jumping method of two wheeled leg robot based on whole body torque control / X. Ya-Xian [et al.] // *Acta Automatica Sinica*. – 2023. – V. 49. – P. 1635-1644. – DOI 10.16383/j.aas.c200486.
4. Height control and optimal torque planning for jumping with wheeled bipedal robots / Y. Zhuang [et al.] // *Proc. of 6th IEEE Int. Conf. on Adv. Robotics and Mechatronics (ICARM)*. – 2021. – P.477–482. – DOI 10.1109/ICARM52023.2021.9536196.
5. Optimal energy consumption trajectory planning for mobile robot based on motion control and frequency domain analysis / Z. W. Gao [et al.] // *Acta Automatica Sinica*. – 2020. – V. 46. – №. 5. – P. 934-945. – DOI 10.16383/j.aas.c180399.
6. Зуев, В. М. Динамика прыгающего колесного робота / В. М. Зуев, Д. А. Первенко // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2026. – № 1(40). – С. 241-253. – DOI 10.24412/2413-7383-2026-1-40-241-253.

7. Innovation at Boston Dynamics [Электронный ресурс]. – URL: bostondynamics.com/about/history/handle (дата обращения 11.11.2025).
8. Franklin, G. F. Feedback Control of Dynamic Systems Pearson Education / G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini. – PDF eBook, Global Edition, 2015. – 880 p.
9. Anderson, B. D. Optimal Control: Linear Quadratic Methods / B. D. Anderson, J. B. Moore. – NY: Dover Publications, inc. Mineola, 2014. – 448 p. – ISBN 978-0-486-45766-6.
10. Ogata, K. Modern Control Engineering. Fifth Ed / K. Ogata. – Prentice Hall, 2010. – 894 p.
11. Greenwood, D. T. Classical Dynamics / D. T. Greenwood. – Cambridge University Press, 2003. – 425 p. – ISBN 978-0-521-82612-9.
12. Murray, R. M. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation / R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry. – CRC Press, 1994. – 456 p. – ISBN 978-0849379819.
13. Математическое введение в роботизированные манипуляции [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cds.caltech.edu/~murray/mlswiki/index.php/Main_Page (дата обращения: 11.11.2025).
14. Khalil, H. K. Nonlinear Systems / H. K. Khalil. – Prentice Hall, 1996. – 734 p. – ISBN 0-13-067389-7.
15. Красовский, А. А. Справочник по теории автоматического управления / А. А. Красовский. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
16. Летов, А. М. Динамика полета и управление / А. М. Летов. – М.: Наука, 1969 – 360 с.
17. Формальский, А. М. Управление движением неустойчивых механических объектов / А. М. Формальский. – Физматлит, 2012. – 232 с. – ISBN 978-5-9221-1460-8.

REFERENCES LIST

1. Design and dynamic analysis of jumping wheel legged robot in complex terrain environment / T. Guo [et al.] // Frontiers in neurorobotics. – 2022. – V. 16. – P. 1066714. – DOI 10.3389/fnbot.2022.1066714.
2. Wu, K. Research on motion control method of biped wheeled robot on complex terrain environment: master's thesis / K. Wu. – Jinan, Shandong University, 2020. – DOI 10.27272/d.cnki.gshdu.2020.005315.
3. Research on jumping method of two wheeled leg robot based on whole body torque control / X. Ya-Xian [et al.] // Acta Automatica Sinica. – 2023. – V. 49. – P. 1635-1644. – DOI 10.16383/j.aas.c200486.
4. Height control and optimal torque planning for jumping with wheeled bipedal robots / Y. Zhuang [et al.] // Proc. of 6th IEEE Int. Conf. on Adv. Robotics and Mechatronics (ICARM). – 2021. – P.477-482. – DOI 10.1109/ICARM52023.2021.9536196.
5. Optimal energy consumption trajectory planning for mobile robot based on motion control and frequency domain analysis / Z. W. Gao [et al.] // Acta Automatica Sinica. – 2020. – V. 46. – №. 5. – P. 934-945. – DOI 10.16383/j.aas.c180399.
6. Zuev, V. M. Dinamika prygaiushchego kolesnogo robota / V. M. Zuev, D. A. Pervenko // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2026. – № 1(40). – S. 241-253. – DOI 10.24412/2413-7383-2026-1-40-241-253.
7. Innovation at Boston Dynamics [Elektronnyi resurs]. – URL: bostondynamics.com/about/history/handle (data obrashcheniia 11.11.2025).
8. Franklin, G. F. Feedback Control of Dynamic Systems Pearson Education / G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini. – PDF eBook, Global Edition, 2015. – 880 p.
9. Anderson, B. D. Optimal Control: Linear Quadratic Methods / B. D. Anderson, J. B. Moore. – NY: Dover Publications, inc. Mineola, 2014. – 448 p. – ISBN 978-0-486-45766-6.
10. Ogata, K. Modern Control Engineering. Fifth Ed / K. Ogata. – Prentice Hall, 2010. – 894 p.
11. Greenwood, D. T. Classical Dynamics / D. T. Greenwood. – Cambridge University Press, 2003. – 425 p. – ISBN 978-0-521-82612-9.
12. Murray, R. M. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation / R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry. – CRC Press, 1994. – 456 p. – ISBN 978-0849379819.
13. Matematicheskoe vvedenie v robotizirovannye manipuliatsii [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.cds.caltech.edu/~murray/mlswiki/index.php/Main_Page (data obrashcheniia: 11.11.2025).
14. Khalil, H. K. Nonlinear Systems / H. K. Khalil. – Prentice Hall, 1996. – 734 p. – ISBN 0-13-067389-7.
15. Krasovskii, A. A. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniia / A. A. Krasovskii. – M.: Nauka, 1987. – 712 s.
16. Letov, A. M. Dinamika poleta i upravlenie / A. M. Letov. – M.: Nauka, 1969 – 360 s.
17. Formalskii, A. M. Upravlenie dvizheniem neustoiichivyykh mekhanicheskikh obieektov / A. M. Formalskii. – Fizmatlit, 2012. – 232 s. – ISBN 978-5-9221-1460-8.

Поступила в редакцию 08.12.2025 г., рекомендована к изданию 19.01.2026 г.

STABILIZATION OF THE POSITION OF A WHEELED JUMPING ROBOT

Zuev V.M., Pervenko D.A., Nitsenko A.V.

This paper describes the stabilization of a wheeled jumping robot's position using the LQR method. It is shown that the LQR method can be modified to be self-adjusting to a given target position. This enables position stabilization over a wider range of influences, is more resilient to external factors, and, unlike PID, does not require reconfiguration of the robot when changing system parameters.

Keywords: robot, jumping, wheeled, stabilization.

Зуев Владимир Михайлович

научный сотрудник, заведующий отделом
ФГБНУ «Институт проблем искусственного
интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: zvm.ipai@mail.ru

Zuev Vladimir Mikhailovich

Researcher, Head of the Department of Institute of
Artificial Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0006-8596-4811

Первенко Дмитрий Александрович

лаборант-исследователь ФГБНУ «Институт
проблем искусственного интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pda.ipai@mail.ru

Pervenko Dmitrii Aleksandrovich

Laboratory Researcher of Institute of Artificial
Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0003-2605-7312

Ниценко Артем Владимирович

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, заведующий отделом
ФГБНУ «Институт проблем искусственного
интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: nav_box@mail.ru

Nitsenko Artem Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of the Department of Institute of Artificial
Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО КЛЮЧЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ КЛАССА D ДЛЯ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

© 2026 Казаков Е.А., Остапенков П.С., Щукин А.В., Филатов В.А., Гусев А.Ю.

В статье рассматривается компьютерная модель многоканального ключевого усилителя класса D. В качестве входного сигнала усилителя используется сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Описываются и обосновываются требования к ШИМ-сигналу и быстродействию элементов усилителя. Особое внимание уделяется расчету и моделированию нелинейных режимов выходного трансформатора многоканального усилителя. Показано, что добавление второго канала усиления позволяет снизить амплитуду спектральных составляющих на частоте ШИМ. Полученные результаты могут быть использованы для разработки передатчиков в системах гидроакустической связи.

Ключевые слова: ключевые усилители мощности, усилители класса D, широтно-импульсная модуляция, SPICE-модели, широкополосные сигналы.

Введение. Для задач гидроакустической связи часто требуются передатчики с высокой выходной мощностью, но, в то же время, обладающие низкими массогабаритными показателями. Одним из основных элементов такого передатчика является усилитель мощности.

Для получения максимальной выходной мощности при компактных размерах усилителя в гидроакустических системах применяют ключевые усилители мощности [1]. Ключевые усилители мощности позволяют получить высокий КПД, превышающий 90% при относительной простоте схемотехнических реализаций [2].

Основным режимом усиления для таких устройств является режим класса D. В таком режиме транзисторы усилителя работают с импульсными сигналами постоянной амплитуды. Следует отметить, что в гидроакустических системах применяются усилители и других классов, таких как E и F, а также гибридные – AD или ABD [1, 3], но усилители класса D являются наиболее компактными при сопоставимой мощности.

Вне зависимости от типа ключевого режима на вход усилителя подается модулированный по определенному закону сигнал. При работе с ключевыми каскадами возможно использовать разные виды модуляции. Например, модуляцию плотности импульса (англ. Pulse Density Modulation – PDM), однобитную дельта-сигма ($\Delta - \Sigma$) модуляцию, широтно-импульсную модуляцию (ШИМ, англ. Pulse Width Modulation – PWM) и др. Перечисленные виды модуляторов широко используются в ключевых усилителях звуковой частоты или в прецизионных ШИМ-модуляторах [2].

Одним из широко применяемых видов модуляции является ШИМ, которая задается ШИМ-модулятором в передающем тракте. ШИМ позволяет осуществлять преобразование входного сигнала в форму, необходимую для ключевого усилителя [1, 2], при этом сам ШИМ-модулятор часто реализуют на основе цифровых схем.

В качестве активных элементов для усилителей класса D часто применяют полевые транзисторы, которые обладают рядом существенных достоинств по сравнению с биполярными: меньшим сопротивлением в открытом состоянии, более высокой скоростью переключения, меньшим тепловыделением и др. [4].

К быстродействию транзисторов в импульсном режиме предъявляются достаточно высокие требования, поэтому на сегодняшний день активно используются полевые транзисторы на основе кремния (Si), карбида-кремния (SiC), нитрида галлия (GaN). Ключи на основе двух последних типов могут работать на более высоких частотах по сравнению с традиционными кремневыми аналогами [3, 5], а также используются в схемах с напряжениями сток-исток 300 В и выше.

Целью работы является получение более точных SPICE моделей ШИМ усилителей по сравнению с открытыми моделями, представленными ведущими производителями САПР, такими как LTspice, TinaTi и пр.

В статье рассматриваются следующие задачи:

1) смягчение требований к рабочим частотам транзисторов передатчика с ШИМ и ключевому усилителю за счет увеличения числа идентичных каналов усиления.

2) создание более точной модели многоканального передатчика с ШИМ, представленной на основе SPICE-симуляторов с учетом нелинейных процессов в выходном трансформаторе.

Структурная схема модели передатчика. На рис. 1 показана обобщенная структурная схема широкополосного передатчика гидроакустической системы связи на базе ключевого усилителя с ШИМ. Рассмотрим более подробно назначение каждого из блоков.

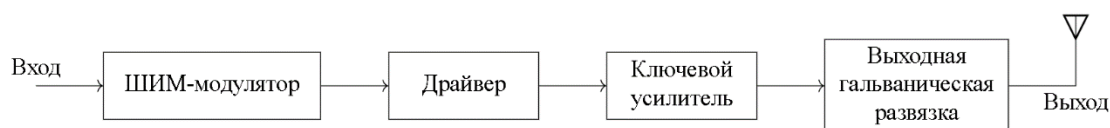


Рис. 1. Структурная схема передатчика гидроакустической системы связи

В качестве ШИМ-модулятора в модели используется модулятор с симметричной ШИМ первого рода [6].

Драйвер обеспечивает согласование токов и напряжений между выходами цифровой микросхемы ШИМ-модулятора и затворами (базами) транзисторов усилителя. В отдельных случаях он также может выполнять защитную функцию, предотвращая одновременное открывание обоих ключей в двухтактных усилителях и преобразователях, вводя “мертвое время” (англ. dead time) между сигналами, подаваемыми на затворы транзисторов.

Усилитель может быть реализован по полумостовой, мостовой или симметричной схемам. Выбор схемы усилителя зависит от множества факторов, но в качестве основных можно выделить:

- тип усиления (усилитель тока или напряжения),
- вид подключения к нагрузке (непосредственное, через фильтрующие цепи или с гальванической развязкой).

Выходная гальваническая развязка, как правило, выполняется на трансформаторе или оптроне.

К передатчикам со структурой подобной, представленной на рис. 1 предъявляется ряд требований:

- частота модуляции $f_{\text{ШИМ}}$ должна превышать верхнюю частоту входного сигнала $f_{\text{в}}$ в $f_{\text{ШИМ}} / f_{\text{в}} \sim 10 - 20$ раз [1, 6].

- мертвое время драйвера t_{DT} должно быть меньше длительности минимального импульса ШИМ (минимального коэффициента заполнения ШИМ) $t_{DT} \ll T_{ШИМ} |_{DC_{min}}$.
- время включения и выключения активных элементов усилителя должно быть меньше периода ШИМ $t_{on} + t_{off} \ll T_{ШИМ}$.
- сердечник выходного трансформатора не должен достигать насыщения на частоте $f_{ШИМ}$. Это требование можно переформулировать относительно оценки токов в обмотках трансформатора. Необходимо, чтобы максимальный ток в обмотках трансформатора I_{max} был меньше, чем ток намагничивания сердечника I_{mag} , $I_{max} < I_{mag}$.

Учет влияния минимального коэффициента заполнения ШИМ. Существуют разные виды реализации ШИМ.

Вид спектра сигнала с ШИМ будет определяться модулируемым сигналом и частотой $f_{ШИМ}$. Причем каждый ШИМ-импульс может иметь различный коэффициент заполнения для изменяющегося во времени модулируемого сигнала, порождая побочные составляющие в спектре ШИМ сигнала.

На рис. 2 показаны амплитудные спектры ШИМ гармонического и ЛЧМ сигналов. На параметры спектров ШИМ сигналов будут влиять как соотношение $f_{ШИМ} / f_{в}$, так и необходимость максимизация частоты $f_{ШИМ}$. При усилении узкополосных сигналов побочные спектральные составляющие могут быть подавлены (сглажены) выходными фильтрующими цепями и/или частотной характеристикой передающей антенны.

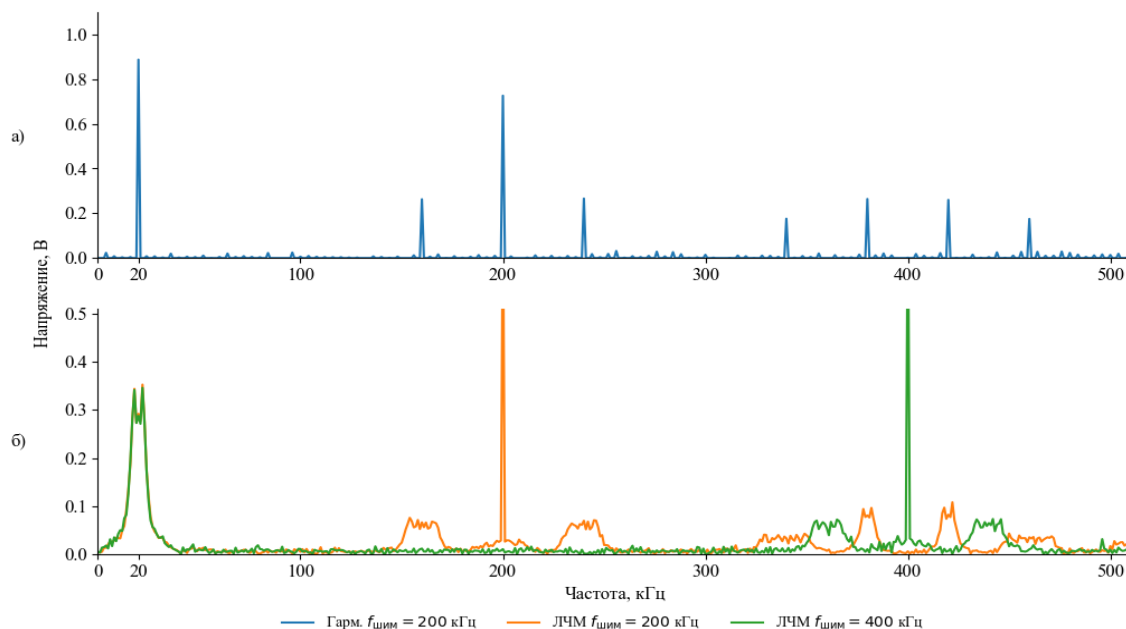


Рис. 2. Спектр ШИМ для разных сигналов:

- а) гармонического сигнала $f_{ШИМ} = 200$ кГц, $f_0 = 20$ кГц;
 б) ЛЧМ сигналов $f_0 = 20$ кГц, $2\Delta f = 10$ кГц при различных $f_{ШИМ} = 200$ (оранжевый) и 400 (зеленый) кГц

Рассмотрим гармоническую ШИМ со следующими допущениями для модели:

- 1) Будем считать, что частота модулируется гармоническим сигналом с частотой $f_0 = 20$ кГц при $f_{ШИМ} = 200$ кГц ($T_{ШИМ} = 5$ мкс).
- 2) Минимальный и максимальный коэффициенты заполнения от $D_{min} = 1\%$ до $D_{max} = 99\%$ будет соответствовать минимальной длительности импульса в одном периоде ШИМ $T_{ШИМmin} = 50$ нс.
- 3) Транзисторы в усилителе должны открываться и закрываться быстрее, чем за $T_{ШИМmin} = 50$ нс (в качестве грубой оценки можно использовать сумму всех задержек транзистора, приводимых в документации, как правило, это $t_{d(on)}$ – время задержки включения (Turn On Delay Time), t_r – время нарастания (Rise Time), $t_{d(off)}$ – время задержки выключения (Turn Off Delay Time), t_f – время спада (Fall Time)). Такая грубая оценка не учитывает длительности фронта и среза импульсов на выходе драйвера, не учитываются рабочие токи и напряжения конкретного устройства, а следовательно, не учитывается фактическая скорость зарядки-разрядки затворной емкости и паразитной емкости затвор-сток).
- 4) Драйвер должен обеспечить мертвое время для импульса длительностью $T_{ШИМmin}$. Причем инерционность (задержки) драйвера, как и ключей, должна быть меньше $T_{ШИМmin}$.

В документации на драйверы указываются задержки включения и выключения t_r , t_f порядка десятков наносекунд.

Возвращаясь к значениям, использованным в качестве примера, если установить $D_{min} 5\%$, в этом случае $T_{ШИМmin} = 250$ нс, что значительно облегчает подбор транзисторов и драйвера к ним, не оказывая существенного влияния на качество модуляции при выполнении условия $f_{ШИМ} / f_v$.

Для ШИМ первого рода достаточно чтобы амплитуда модулируемого сигнала была меньше, чем амплитуда опорного треугольного или пилообразного сигнала на 1 – 5%, но только выполнения этого условия не достаточно. Возможны случаи, когда уменьшение длительности коротких ШИМ-импульсов, может приводить к пропускам коротких импульсов драйвером или транзистором. Пропуски коротких импульсов с малыми D_{min} или высокими D_{max} будут приводить к некорректной модуляции амплитудных значений входного сигнала.

В качестве примера на рис. 3 приведены спектры и временные диаграммы ШИМ гармонического сигнала $f_0 = 20$ кГц, $f_{ШИМ} = 200$ кГц для полного размаха исходного сигнала - 100% (полная шкала) и 90% (минус 5% от максимума и минимума амплитуды) от опорного напряжения. Все значения по оси абсцисс на рис. 3 приводятся в относительных единицах.

Как видно из рис. 3, модуляция с частичным размахом равным 0,9 В (полный размах амплитуды ШИМ 1,0 В) не приводит к существенным изменениям формы спектра ШИМ сигнала (см. рис. 3а), но увеличивает D_{min} и уменьшает D_{max} (рис. 3б, в) на несколько процентов, что допустимо для рассматриваемого случая.

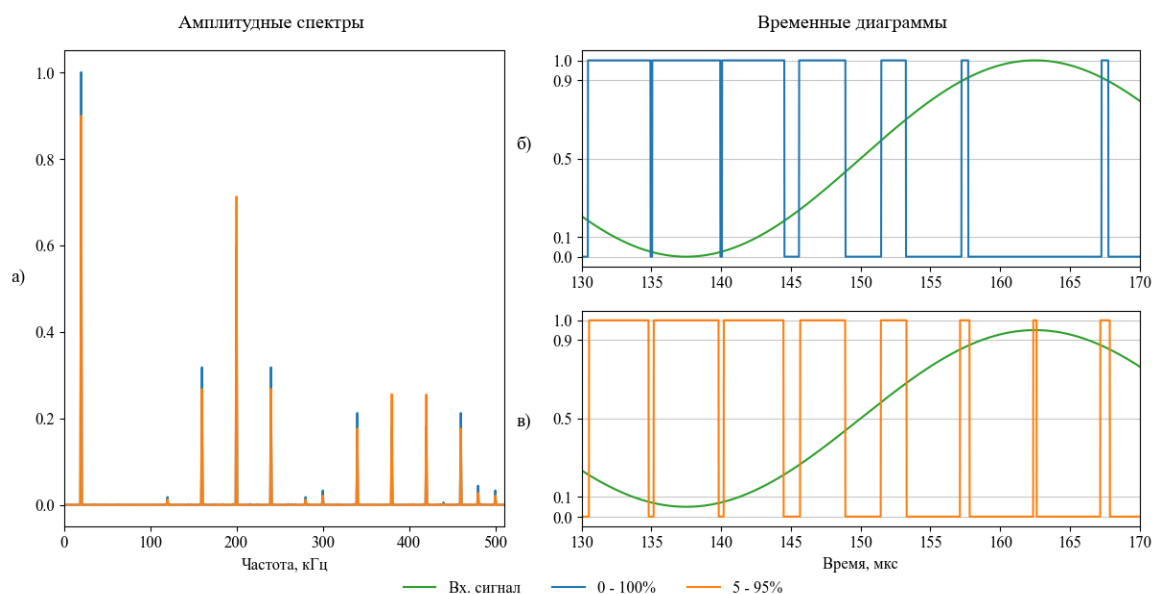


Рис. 3. Спектры и временные диаграммы ШИМ гармонического сигнала:

а) спектр гармонического ШИМ сигнала при $f_0 = 20$ кГц, $f_{\text{ШИМ}} = 200$ кГц;

б) осциллограмма ШИМ с полным размахом шкалы; в) осциллограмма ШИМ с 90% размахом шкалы

Проводя анализ результатов можно выделить взаимоисключающие требования к параметрам ШИМ усилителя передатчика:

1) увеличение частоты $f_{\text{ШИМ}}$ с целью повышения точности ШИМ. Повышение частоты $f_{\text{ШИМ}}$ снижает требования к АЧХ выходных цепей усилителя и обеспечивает запас по частоте $f_{\text{в}}$ для усиления широкополосных сигналов.

2) уменьшение $T_{\text{ШИМmin}}$ при увеличении $f_{\text{ШИМ}}$ повышает требования к элементной базе передатчика, требуется уменьшение параметров t_r, t_f для транзисторов и драйверов.

Формализовать эти требования можно так:

$$\text{максимум } f_{\text{ШИМ}} / f_{\text{с}} ;$$

$$\text{максимум } T_{\text{ШИМ}} \text{ при } D_{\text{min}} . \quad (1)$$

Увеличение числа каналов усилителя позволяет смягчить требования (1).

Многоканальное усиление ШИМ сигнала. Требования к D_{min} и $f_{\text{ШИМ}} / f_{\text{в}}$ независимы. Выполнение одного из них не означает, что будет выполняться другое. В случае, если D_{min} корректируется ШИМ-модулятором, как описано выше, выполнение соотношений требует иного вида решений. Одним из решений может быть увеличение числа каналов усилителя.

При построении многоканального ключевого усилителя следует учесть несколько важных особенностей:

1) усложнение структуры ШИМ-модулятора, установка начальных фаз опорных напряжений модулятора для каждого канала.

2) необходимость в добавлении выходного сумматора для сложения напряжений от разных каналов.

Первый фактор может быть обеспечен при формировании ШИМ на основе цифровых схем, микроконтроллеров, ПЛИС и др., поэтому в рамках представленной модели рассматриваться не будет. Второй фактор будет подробнее рассмотрен далее.

Проверка моделей проводилась в САПР LTspice, но для подобных задач может быть использована любая схемотехническая САПР с поддержкой SPICE: Qucs, Micro-Cap, KiCad и др.

Расчет трансформатора. Трансформаторный сумматор состоит из нескольких отдельных трансформаторов с параллельно включенными вторичными обмотками. Реализацию трансформатора с несколькими первичными обмотками и одной вторичной также можно назвать трансформаторным сумматором, однако в такой схеме сложение мощностей не происходит.

Каналы являются идентичными, поэтому для расчета трансформаторного сумматора достаточно рассчитать только один трансформатор для одного из канала усилителя. Воспользуемся известными соотношениями для расчета трансформаторов вторичных источников электропитания.

Для расчета трансформатора необходимо задать входное U_1 и выходное U_2 напряжение трансформатора и его выходную мощность $P_{вых}$ трансформатора.

Число витков первичной обмотки рассчитывается по формуле (2), которая выводится из закона электромагнитной индукции [7]:

$$U_1 \cdot D_{max} \cdot T_{ШИМ} = N_1 \cdot A_e \cdot \Delta B, \quad (2)$$

где U_1 – напряжение на первичной обмотке трансформатора, D_{max} – максимальный коэффициент заполнения ШИМ, $T_{ШИМ}$ – период ШИМ, N_1 – число витков первичной обмотки трансформатора, A_e – эффективная площадь сечения сердечника (приводится в документации на сердечник), $\Delta B = B_{max} - B_r$ – разность магнитной индукции материала сердечника и остаточной индукции.

На практике, максимальная индукция B_{max} выбирается в диапазоне 0,2–0,3 (в импульсных режимах, для прочих 0,7–0,8) от индукции насыщения материала B_s , чтобы избежать насыщения сердечника. Значения B_s и B_r приводятся в документации на материал. В документации также приводится значение коэрцитивной силы H_c (в случае, если B_r не указано, его можно рассчитать с помощью материального уравнения $B_r = \mu_0 \mu_e H_c$, где μ_0 – магнитная постоянная, μ_s – эффективная относительная магнитная проницаемость материала сердечника).

Следующим этапом является проверка на насыщение. Требуется, чтобы максимальный ток намагничивания сердечника I_M был больше максимального входного тока I_1 . Ток намагничивания вычисляется по формуле (3) [8].

$$I_M = \frac{B_{max} l_e}{\mu_0 \mu_e N_1}, \quad (3)$$

где I_M – максимальный ток намагничивания, B_{max} – максимальная магнитная индукция материала сердечника, l_e – средняя длина магнитного пути.

Моделирование трансформатора. Для моделирования трансформатора необходимо знать напряжения (токи) вторичной и первичной обмоток и параметры сердечника.

В LTspice возможно производить моделирование связанных линейных и нелинейных индуктивностей. Для этого используется SPICE-директива K , с числовым параметром, задающим коэффициент связи между индуктивностями (см. [9], раздел F.A.Q./Simulating Transformers). Эта модель учитывает индуктивность рассеяния трансформатора, но не содержит информации о его сердечнике.

Для моделирования нелинейных индуктивностей в LTspice используется модель Джона Чана (см. [9], раздел LTspice Simulator/Circuit Elements/L Inductor) [10]. Модель Чана учитывает насыщение и потери в сердечнике трансформатора на основе эмпирических аппроксимаций. Модель позволяет проводить эксперименты с различными материалами сердечников, но не позволяет создать трансформатор с нелинейным сердечником или с индуктивностью рассеяния через параметр K . Это ограничение основано на том, что директива K не работает с нелинейными индуктивностями. Модель Чана предполагает, что магнитное поле однородно в воздухе и сердечнике, но поле не будет однородным, если $K \neq 1$. В этой связи модели нелинейных трансформаторов, основанные на стандартных примитивах LTspice довольно сложны и содержат ряд компромиссов (см. [9] примеры к LTspice NonLinearTransformer.asc).

Кроме линейной модели с потерями и упрощенной нелинейной модели Чана существует также более точная нелинейная модель Джилса-Атертона [11]. Модель Джилса-Атертона является наиболее сложной и требует решения однородного дифференциального уравнения изменения магнитной индукции $\frac{dB}{dH}$ относительно

изменения идеальной гистерезисной кривой $B(H)$. Кроме того, в модели Джилса-Атертона учитываются параметры для магнитного материала и такие параметры, как: коэффициенты кривой гистерезиса, коэффициент потерь на гистерезис, поправочный коэффициент и др. Высокоточную модель Джилса-Атертона уместно применять для изучения свойств магнитных материалов и точного моделирования петли гистерезиса в отрыве от остальной системы.

В нашем случае оптимальным выбором является Модель Чана, поскольку модель имеет меньшую вычислительную сложность и большую устойчивость, чем модель Джилса-Атертона, но позволяет учесть гистерезис и насыщение сердечника трансформатора.

Модель Чана в LTspice имеет ряд ограничений. В рамках работы использовались модели трансформаторов и из открытых источников [12], доступные линейные и нелинейные модели сердечников, модели обмоток с учетом паразитных параметров и пр.

Здесь и далее всё, что относится к первичной обмотке, будем обозначать подстрочным индексом 1, для вторичной – 2.

Пусть требуется рассчитать трансформатор на выходную мощность $P_{вых} = 48$ Вт, а U_2 и $U_1 = 48$ В. Для этого выбираем сердечник для трансформатора. По формуле (2) рассчитывается число витков в обмотке с учетом частоты $f_{ШИМ}$. Из условия (1), необходимости увеличения частоты ШИМ, требуется выбрать материал сердечника таким, чтобы он не уходил в насыщение на частоте ШИМ.

В качестве примера рассмотрим Ш-образный сердечник EQ 25/5,6/18 [13] из феррита N49 производства EPCOS (TDK) [14]. Параметры сердечника: эффективная

площадь сечения $A_e = 93,51 \text{ мм}^2$, длина магнитного пути $l_e = 32,95 \text{ мм}$, относительная магнитная проницаемость $\mu_e = 1500$, коэрцитивная сила $H_c = 38 \text{ А/м}$, индукция насыщения $B_s = 490 \text{ мТл}$, рекомендуемый частотный диапазон $300\text{--}1000 \text{ кГц}$.

Подставив параметры материала и сердечника в (2) при: $U_1 = 48 \text{ В}$, $D_{\max} = 0,95$, $f_{\text{ШИМ}} = 200 \text{ кГц}$, получим $N_1 = 33$ витка (при округлении большую сторону).

При моделировании необходимо учесть, что стандартная модель LTspice принимает на вход индуктивность обмотки, а не число витков как модель Чана. Для пересчета используем формулу (4) [8]:

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_e N_1^2 A_e}{l_e}. \quad (4)$$

Из (4) получаем $L_1 = 5,8 \text{ мГн}$. Довольно высокое значение обусловлено $\mu_e = 1500$ и сравнительно большим числом витков.

Проверим расчет. Рассчитаем число вольт на один виток обмотки по формуле (5) [8].

$$\frac{V}{1} = \frac{V_1 D_{\max}}{N_1}. \quad (5)$$

Получим $1,35 \text{ В/виток}$. Проверить это значение можно по документации на феррит, по графику относительных потерь в материале от частоты при разных значения магнитной индукции (англ. Relative core losses versus frequency). Для материала N49 см. [14]. Зная индукцию, допустимое число вольт на виток можно оценить по формуле (6).

$$\frac{V}{1} = \Delta B A_e \frac{f}{D_{\max}}. \quad (6)$$

На низкой частоте $f_0 = 20 \text{ кГц}$, где потери малы, сердечник оказывается недоиспользован $0,2 \text{ В/виток}$, но на частоте $f_{\text{ШИМ}} = 200 \text{ кГц}$ получим 2 В/виток , при этом потери не превышают 200 кВт/м^3 [7, 8].

В завершении тестового расчета оценим ток насыщения. В соответствии с формулой (3) $I_M = 0,78 \text{ А}$. Ожидается, что при превышении $I_M = 0,78$ ток в обмотке будет резко возрастать.

Проверяем, выполняется ли неравенство $\frac{V}{1} < \frac{V}{1}$. Подставив численные значения, получим: $1,35 < 2 \text{ В/виток}$, т.е. условия выполняются.

В САПР LTspice проведем сравнение трёх моделей: стандартной линейной модели LTspice с использованием коэффициента связи K1, линейную модель coreLin_A_Lm из внешней библиотеки, нелинейную модель Чана из внешней библиотеки core [12].

На рис. 4 изображены схемы этих моделей с параметрами, рассчитанными выше для EQ 25/5,6/18 и N49. Здесь и далее все расчеты будем производить для симметричных трансформаторов, т. е. $U_1 = U_2$, $N_1 = N_2$.

Модель с названием core (рис. 4в) является модификацией модели Чана реализованной в LTspice с более удобным интерфейсом. Модель с обозначением

coreLin_A_Lm (рис. 4б) является линейной, A_Lm в имени модели указывает на ее основные параметры A_e и l_e .

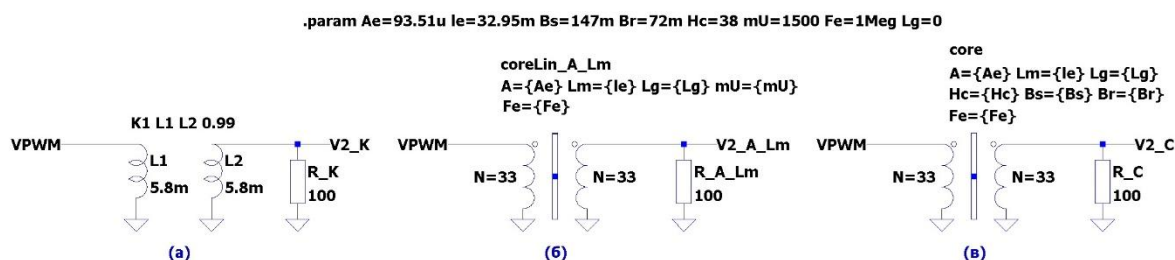


Рис. 4. Модели трансформаторов в LTspice:

- а) стандартная с K1; б) линейная из внешней библиотеки coreLin_A_Lm;
в) нелинейная модель Чана (core) из внешней библиотеки

Перейдем к описанию процесса моделирования. На вход каждой из моделей подается ШИМ-сигнал с частотой $f_{\text{ШИМ}} = 200$ кГц, сформированный на основе гармонического сигнала с частотой $f_0 = 20$ кГц.

На рис. 5 показаны результаты моделирования токов в обмотках трансформаторов для моделей core и core_AL_Lm.

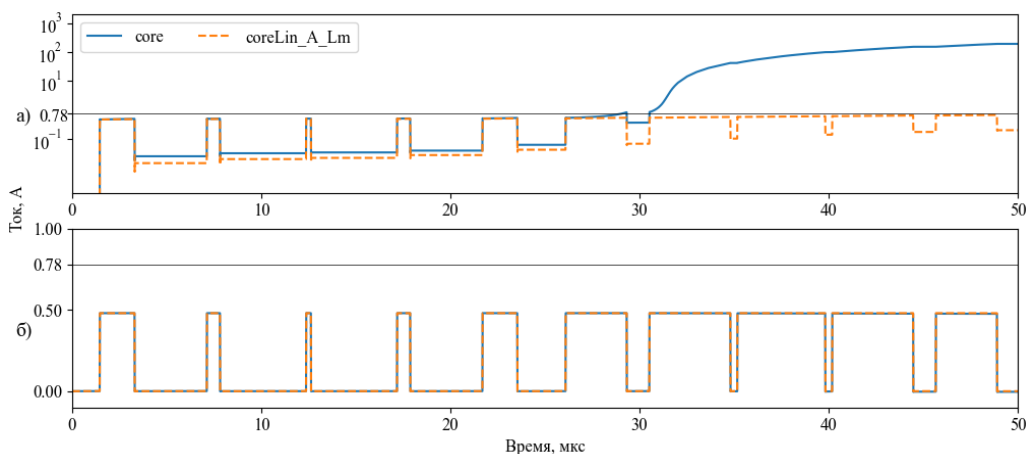


Рис. 5. Токи обмоток трансформаторов на основе моделей из внешних библиотек (core, coreLin_A_Lm): а) первичных обмоток; б) вторичных обмоток

По результатам моделирования, представленным на рис. 5 видно, что сердечник трансформатора претерпевает насыщение уже через 30 мкс, как только ток первичной обмотки превышает I_M . Ток линейной модели также плавно нарастает (рис. 5а, штриховая линия). Рост тока в первичных обмотках трансформаторов объясняется сложной формой входного ШИМ-сигнала и накоплением постоянной составляющей.

При расчете N_1 выше (см. формулу 2) использовалась константа $D_{max} = 0,95$ для учета самого длительного из возможных импульсов напряжения за период $0,95 T_{\text{ШИМ}}$. За время импульса в первичной обмотке будет накапливаться ток I_M . Со временем может возникнуть превышение порога по току (см. рис. 5а в районе 30 мкс), которое указывает на насыщение сердечника.

Рассмотрим, что произойдет, если подать два или более таких импульсов подряд, как при работе ШИМ-модулятора. В этом случае обмотка трансформатора не успеет

разрядиться и при следующем импульсе ток в обмотке превысит I_M , что и наблюдается на рис. 5а. Получается, что при расчете трансформатора с ШИМ в формуле (2) необходимо учитывать не значение константы D , а вводить периодическую функцию от времени $D(t)$.

В то же время, эпюры токов вторичных обмоток (рис. 5б) показывают, что трансформатор работает штатно и токи обмоток не превышают I_M для обеих моделей. Такая форма токов вторичных обмоток говорит о том, что трансформатор еще пропускает энергию, даже при насыщении первичной обмотки. Этот эффект ожидаем, поскольку все модели нагружены на сопротивление 100 Ом и ток вторичной обмотки определяется именно этим значением тока $I_2 = U_2/R = 0,48$ А.

Отметим также, что ток первичной обмотки I_1 для нелинейной модели core растёт значительно быстрее (рис. 5а), так как нелинейная модель core учитывает гистерезис и насыщение сердечника. Можно заключить, что модели работают корректно, но сложно считать точность расчета приемлемой.

В случае стандартной линейной модели LTspice, как показано на рис. 6, ситуация несколько отличается от моделирования линейной модели coreLin_A_Lm рис. 5, ток в первичной обмотке линейно возрастает.

Первичная обмотка подключена к источнику напряжения ШИМ $U_1 = 48$ В и внутренним сопротивлением 1 мОм.

Одним из ограничений САПР является то, что “идеальные” источники тока и напряжения в LTspice не допускаются. Внутреннее сопротивление источника входного сигнала Rser совместно с индуктивностью L_1 образуют фильтр нижних частот (ФНЧ). Сопротивление Rser и L_1 включены параллельно, частота среза равна $f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_{ser}/L_1} \approx 100$ Гц. Получаем, что такая цепь будет подавлять входной ШИМ-сигнал с частотой $f_{ШИМ} = 200$ кГц.

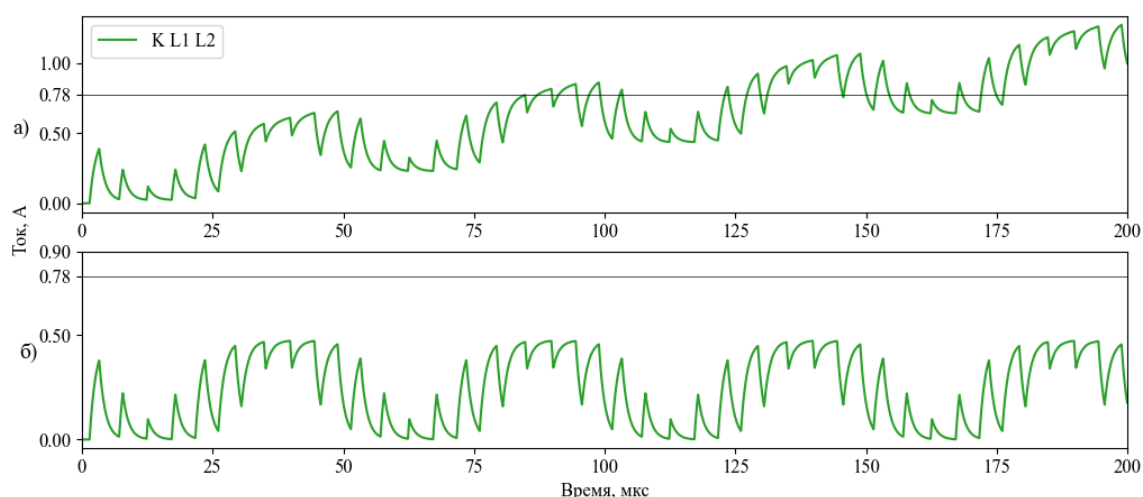


Рис. 6. Токи обмоток стандартной модели трансформатора в LTspice:
а) первичных обмоток; б) вторичных обмоток

Во вторичной обмотке индуктивность L_2 и резистор нагрузки R_K также образуют ФНЧ с частотой среза $f_{L2} \approx 100$ кГц и протекающим током $I_2 = U_2/R_K = 0,48$ А.

В первичных обмотках моделей накапливается постоянная составляющая, поскольку расчет по формуле (2) производится для одного периода ШИМ без учета сложной формы ШИМ-сигнала.

Для подавления постоянной составляющей I_1 подключим емкость $C_{\delta 1}$ последовательно с первичной обмоткой. Емкость $C_{\delta 1}$ должна быть такой, чтобы ее комплексное сопротивление $Z_{C_{\delta 1}}$ было больше комплексного сопротивления первичной обмотки Z_{L_1} на частоте $f_{ШИМ}$. С другой стороны, $Z_{C_{\delta 1}}$ должно быть меньше Z_{L_1} на частоте f_0 . Такие требования к $C_{\delta 1}$ удобно выразить неравенством (7):

$$Z_{L_1}(f_0) < Z_{C_{\delta 1}} < Z_{L_1}(f_{ШИМ}). \quad (7)$$

Для индуктивностей обмоток $L_1 = L_2 = 5,8$ мГн, при $f_0 = 20$ кГц и $f_{ШИМ} = 200$ кГц, значение емкости должно находиться в пределах от 110 пФ до 11 нФ.

На рис. 7 показаны результаты повторного моделирования с подключенной емкостью $C_{\delta 1} = 10$ нФ.

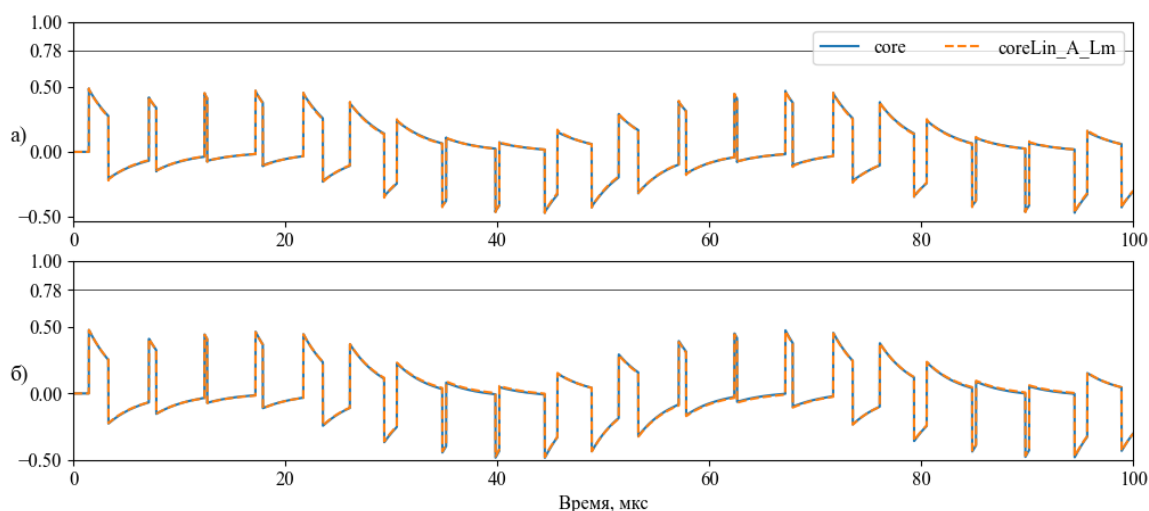


Рис. 7. Эпюры токов в обмотках трансформаторов для модели core с подключенной блокировочной емкостью $C_{\delta 1}$: а) первичная обмотка; б) вторичная обмотка

На рис. 7 можно наблюдать, что постоянная составляющая тока I_1 отсутствует и обе обмотки работают в линейном режиме. При этом ток в трансформаторе определяется сопротивлением нагрузки, а часть высокочастотных спектральных составляющих ШИМ подавляется конденсатором $C_{\delta 1}$.

Моделирование ключевого усилителя. Проведем моделирование одноканального ключевого усилителя с использованием модели выходного трансформатора core, которая была рассчитана выше. Модель двухтактного усилителя класса D в САПР LTspice выполненного по полумостовой схеме представлена на рис. 8.

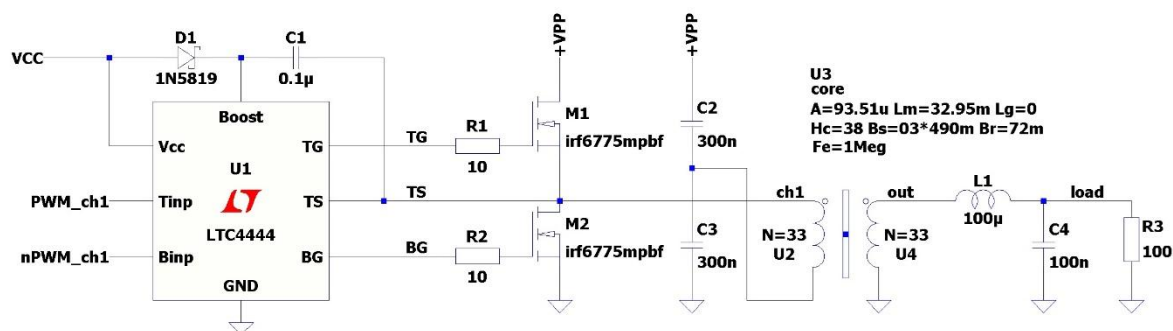


Рис. 8. Модель усилителя класса D в LTspice

На вход модели подается гармонический сигнал с частотой $f_0 = 20$ кГц, изменяющийся в диапазоне от 0,1 до 3,0 В, что составляет 95% от полного диапазона входного напряжения 0 – 3,3 В. Входной сигнал с частотой 20 кГц модулируется ШИМ с частотой $f_{\text{ШИМ}} = 200$ кГц и амплитудой 3,3 В. Прямой и инверсный сигналы PWM_ch1 и nPWM_ch1 имеют мертвое время 20 нс.

Входные сигналы подаются на драйвер U1 модели LTC4444 из стандартной библиотеки LTspice. Драйвер обеспечивает время нарастания $t_{r(\text{TG})} = 3$ нс и время спада $t_{f(\text{TG})} = 8$ нс при емкости нагрузки 1 нФ для верхнего плеча выход TG и $t_{r(\text{BG})} = 3$ и $t_{f(\text{BG})} = 6$ нс для нижнего плеча (выход BG). Драйвер обладает быстродействием 10 нс по описанию производителя. LTC4444 подключен к источнику питания VCC 10 В и имеет цепь с бутстерной емкостью C1.

Выходы драйвера подключены к затворам полевых транзисторов Irf6775 (M1, M2) через затворные резисторы R1 R2. Транзисторы Irf6775 имеет следующие основные характеристики: напряжение сток-исток $V_{\text{DS}} = 150$ В, рабочий ток стока $I_{\text{D}} = 28$ А (при $V_{\text{GS}} = 10$ В) и сопротивление канала в открытом состоянии $R_{\text{DS(on)}} = 47$ мОм (при $V_{\text{GS}} = 10$ В). Усилитель подключен к источнику питания Vpp 48 В. Напряжение питания выбрано из стандартного ряда напряжения и меньше максимального рабочего напряжения драйвера $V_{\text{IN}} = 100$ В.

Выход усилителя подключен к первичной обмотке выходного трансформатора U2 с числом витков $N_1 = 33$. Для подавления постоянной составляющей к обмотке N_1 подключен емкостной делитель, образованный конденсаторами C2, C3. На рис. 8 (и далее) результаты приведены для нелинейной модели трансформатора core с обозначением U3.

Вторичная обмотка трансформатора U4 с числом витков $N_1 = N_2 = 33$ подключена к индуктивности L1. Нагрузка усилителя представлена RC-цепью R3 C4, которая является грубым эквивалентом гидроакустической антенны с высокой реактивной составляющей. Индуктивность L1 и C4 емкость нагрузки образуют ФНЧ с частотой среза $f_{\text{ср}} = 70$ кГц для фильтрации ШИМ составляющих в выходном сигнале.

Проведем моделирование работы усилителя при усилении гармонического сигнала с частотой $f_0 = 20$ кГц и ШИМ с частотой $f_{\text{ШИМ}} = 200$ кГц. На рис. 9 показаны результаты моделирования одноканального усилителя рис. 8. Рассмотрим напряжение на нагрузке усилителя, цепь с обозначением load. Несмотря на использование выходного

ФНЧ, часть спектральных составляющих, в том числе составляющих, которые лежат ниже $f_{\text{ШИМ}}$, были пропущены в нагрузку.

Даже при усилении гармонического сигнала и отношении $f_{\text{ШИМ}} / f_0 = 10$ разница амплитуд полезного сигнала и составляющих на частоте ШИМ составляет 20 дБ. Искажения выходного сигнала, представленные на рис. 9а, существенны и легко различимы визуально.

Улучшить качество выходного сигнала можно, увеличив индуктивность $L1$ и/или увеличить частоту ШИМ. Увеличение индуктивности фильтра приведет к большим потерям мощности в выходной цепи. Увеличение частоты ШИМ может привести к пропускам импульсов с малыми коэффициентами заполнения D и повысит требования к скоростям переключения активных элементов и драйвера.

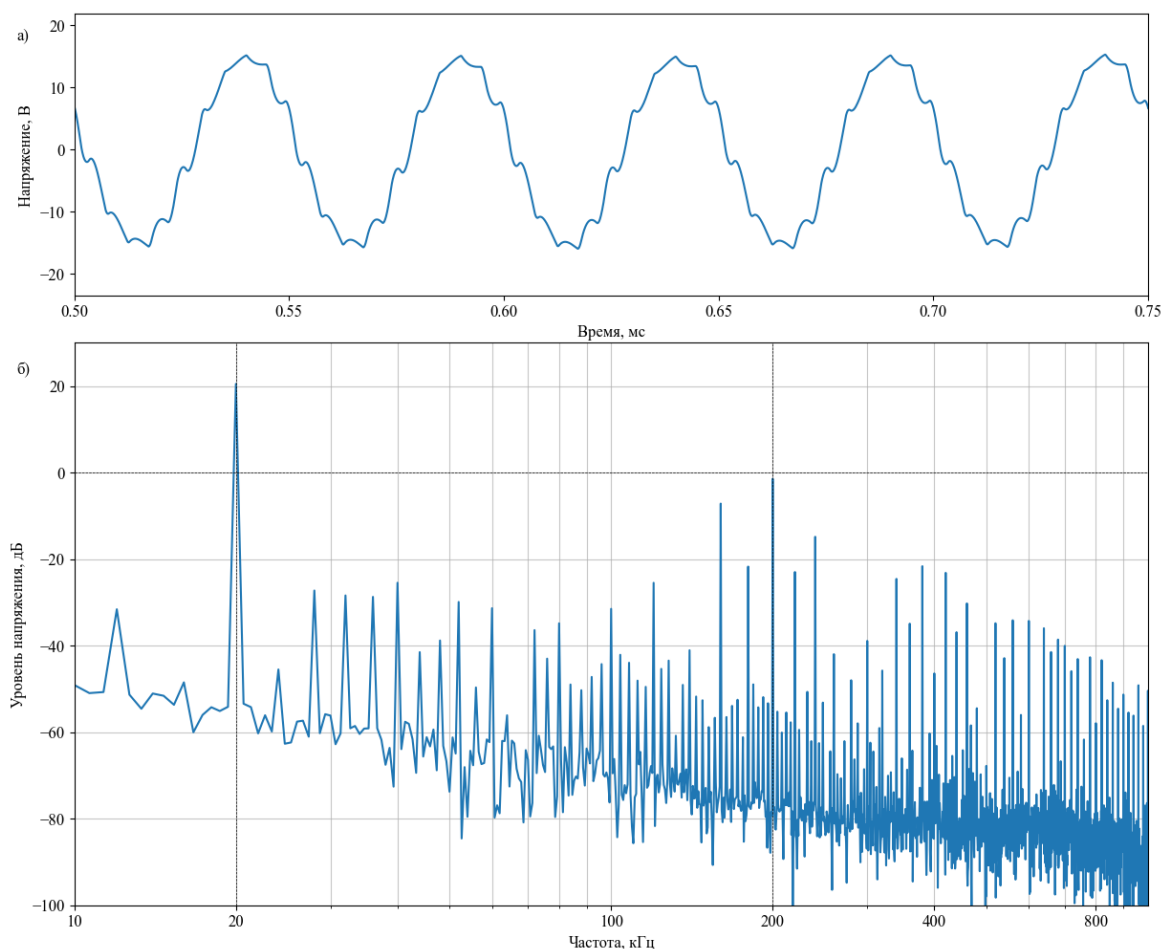


Рис. 9. Результаты моделирования одноканального усилителя:
а) напряжение на нагрузке; б) амплитудный спектр на нагрузке

Другим решением для устранения ШИМ-составляющих в выходном сигнале является введение предискажения во входной сигнал. Однако, при использовании одного канала ШИМ-модулятора диапазон для наложения предискажений крайне ограничен.

Моделирование многоканального усилителя. Наиболее оптимальным решением для подавления спектральных составляющих ШИМ является использование нескольких ШИМ-сигналов с различными начальными фазами.

По аналогии со сложением гармонических колебаний, в результате которого формируются два колебания на суммарной и разностной частоте, при сложении двух и более ШИМ сигналов с частотами $f_{\text{ШИМ}}$ основная гармоника суммарного ШИМ сигнала будет располагаться на частоте $nf_{\text{ШИМ}}$, где n – число каналов усилителя (ШИМ-модулятора). Соответственно и выходная мощность многоканального усилителя может быть увеличена в n раз, по сравнению с одноканальным.

На рис. 10 показана модель двухканального усилителя класса D.

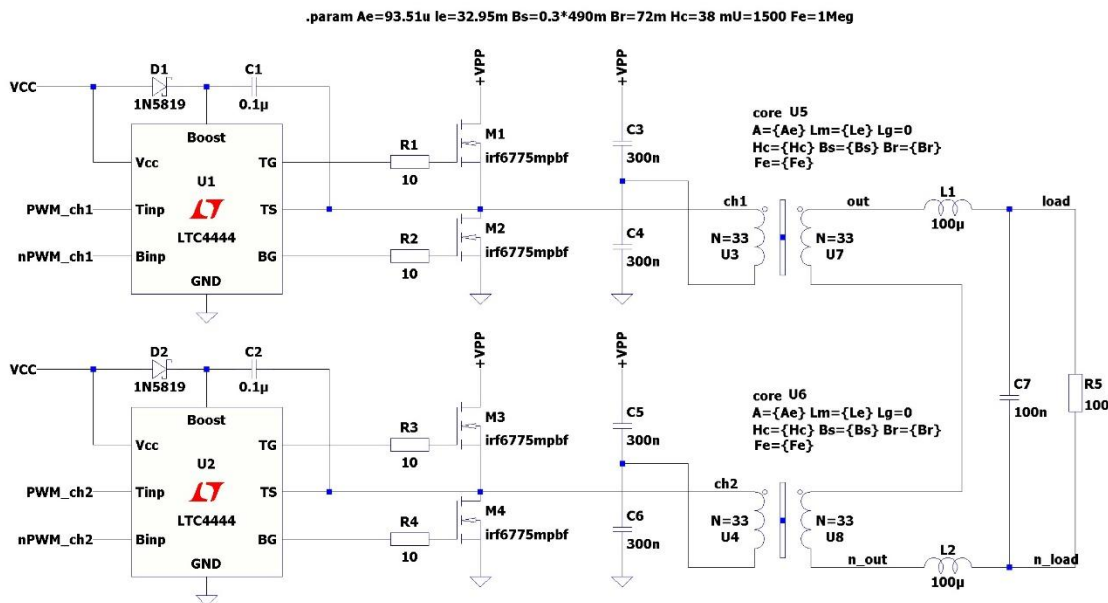


Рис. 10. Модель двухканального усилителя класса D в LTSpice

Для многоканальной реализации опорные сигналы ШИМ-модулятора должны быть попарно противофазны. Для двух каналов усиления начальные фазы опорного пилообразного или треугольного сигналов ШИМ-модулятора будут равны 0° и 180° . Тогда низкочастотные информационные составляющие суммарного с ШИМ сигнала будут синфазны, а высокочастотные модулирующие составляющие противофазны. Сложение противофазных высокочастотных составляющих приведет к формированию многоуровневой ШИМ.

На рис. 11 показаны результат моделирования суммарного ШИМ сигнала двухканального усилителя (цепи out, n_out).

Как видно из рис. 11б, применение двухуровневой ШИМ на основе двух каналов усиления эффективнее также и потому, что модулирующие ШИМ сигналы противофазны, и диапазон 20 – 200 кГц практически не содержит спектральных составляющих выше уровня -20 дБ, что облегчает фильтрацию выходного сигнала усилителя.

Сравним спектры выходных сигналов одноканального и двухканального усилителей. При входном ЛЧМ сигнале с центральной частотой $f_0 = 20$ кГц и полосой 10 кГц при $f_{\text{ШИМ}} = 200$ кГц. На рис. 12 показаны нормированные амплитудные спектры напряжений на нагрузках двух усилителей. Для одноканальной модели, представленной на рис.8, – это спектр напряжения $V(\text{load})$, для двухканальной (см. рис. 10), – это разность напряжений $V(\text{load}) - V(\text{n_load})$.

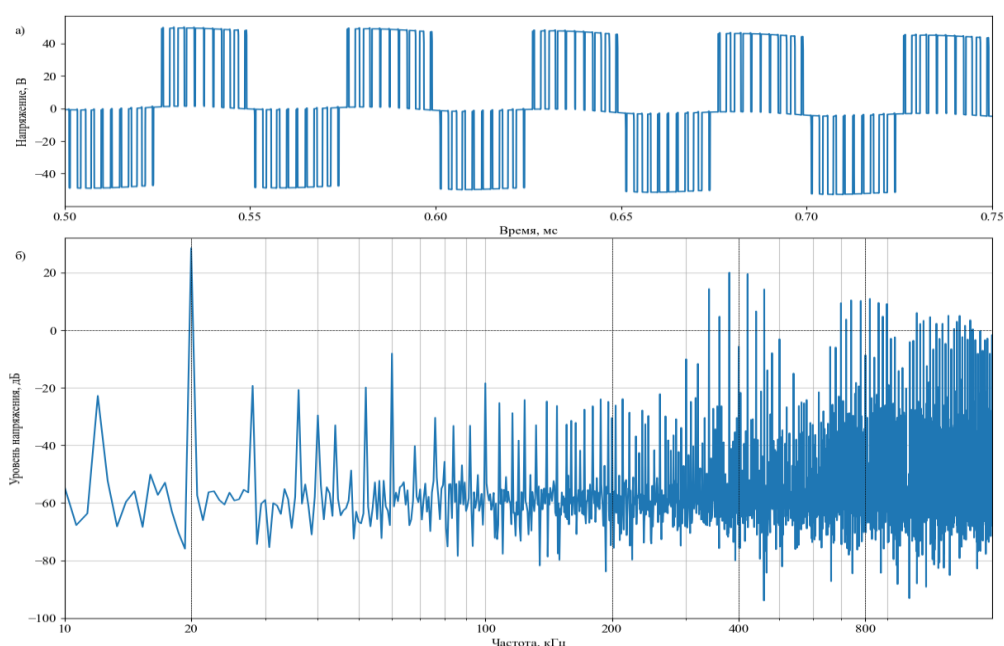
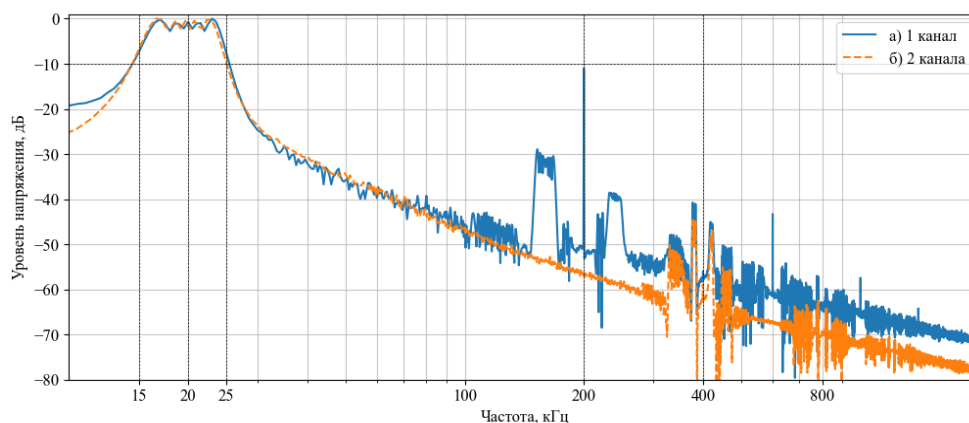


Рис. 11. Двухуровневая ШИМ:

а) напряжение на нагрузке; б) амплитудный спектр на нагрузке

Анализируя рис. 12 видно, что на частоте $f_{\text{ШИМ}}$ 200 кГц разность уровней между одноканальной и двухканальной моделями составляет -55 дБ по напряжению. В двухканальной схеме противофазные составляющие на частоте 200 кГц вычитаются, уровни синфазных составляющих спектра в районе $2f_{\text{ШИМ}}$ 400 кГц практически совпадают.

Рис. 12. Нормированные спектры выходных ЛЧМ сигналов $f_0 = 20$ кГц, $2\Delta f = 10$ кГц:

а) одноканальный усилитель с ШИМ; б) двухканальный усилитель с ШИМ

Таким образом, добавление второго канала усилителя, помимо увеличения выходной мощности, снижает требования к фильтрующим выходным цепям и позволяет расширить полосу усиливаемого сигнала или понизить частоту ШИМ для каждого канала в 2^{n-1} раз на каждый добавленный канал. Понижение частоты ШИМ в многоканальных схемах может применяться для снижения требований к быстродействию драйверов и силовых ключей.

Выводы. В статье представлено сравнение разных моделей трансформаторов для усилителей с ШИМ. Стандартные модели производителей САПР не являются «идеальными» и требуют уточнения. Использование линейных SPICE моделей трансформаторов даёт грубую оценку параметров и часто модели дополнительно должны быть доработаны с учетом особенностей конкретной практической задачи.

Представленные сравнительные результаты моделирования трансформаторов на основе линейной модели и упрощенной нелинейной модели Чана, показывают, что нелинейная модель работает более точно, позволяя проводить моделирование эффекта насыщения сердечника трансформатора при воздействии ШИМ сигнала.

Применение многоканальных усилителей с многоуровневой ШИМ позволяет смягчить выполнение требований к быстродействию транзисторов и драйверов схемы, повысить выходную мощность за счет сложения мощностей каждого из каскадов.

К минусам многоканальных схем можно отнести более высокие требования к источникам питания и опорным напряжениям, а также необходимость в многоканальном ШИМ-модуляторе, обеспечивающим точную настройку фаз.

Полученные результаты и предложения по корректировке моделей усилителей класса D с ШИМ могут быть использованы при разработке прецизионных компактных энергетически эффективных усилителей класса D, включая усилители и модуляторы сигналов гидроакустических систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Динамические потери энергии в ключевых усилителях мощности в составе гидроакустического передающего тракта / В. А. Александров, О. В. Воробьев, Ю. В. Казаков, Л. В. Маркова // Труды учебных заведений связи. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 14-26. – DOI 10.31854/1813-324X-2022-8-3-14-26.
2. Grebennikov, A. Switchmode RF and microwave power amplifiers / A. Grebennikov, M. J. Franco // Academic Press, 2021. – 650 p. – ISBN 978-0-12-821769-8.
3. The class D audio power amplifier: A review / S. Mei [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, no. 19. – P. 3244. – DOI: 10.3390/electronics11193244.
4. Comparison of GaN, SiC, Si technology for high frequency and high efficiency inverters / S. K. Pullabhatla [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 184. – P. 01012. – DOI 10.1051/e3sconf/202018401012.
5. Оценка моделей полевых транзисторов для широкополосных усилителей класса D / Е. А. Казаков, П. С. Остапенков, Е. Д. Соловьев, А. В. Шукин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 35-46. – DOI 10.5281/zenodo.14514520. – EDN QTUBTR.
6. Исследование цифровых методов генерации сигналов гидроакустических фазированных антенных решеток / В. А. Александров, А. П. Буянов, Л. В. Маркова, М. А. Сиверс // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 42-53. – DOI 10.31854/1813-324X-2021-7-1-42-53.
7. Section 4 – Power Transformer Design // Texas Instruments: – Seminar on Power Supply Design; SLUP126 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf> (дата обращения 05.12.2025).
8. Mohan, N. Power electronics, a first course: simulations and laboratory implementations / N. Mohan, S. Raju // John Wiley & Sons, 2022. – 432 p. – ISBN 978-1-119-89845-2.
9. LTspice XVII [Электронный ресурс]. – URL: <https://agnd.net/valpo/341/LTspiceHelpXVII.pdf> (дата обращения 05.12.2025).
10. Nonlinear transformer model for circuit simulation / J. H. Chan [et al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1991. – Vol. 10, no. 4. – P. 476–482. – DOI: 10.1109/43.75689.
11. Jiles, D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61, no. 1–2. – P. 48–60. – DOI 10.1016/0304-8853(86)90066-1.
12. For LTspice users: libraries of models, examples, etc [Электронный ресурс]. – URL: <http://bordodynov.ltwiki.org/> (дата обращения 05.12.2025).
13. TDK. Ferrites and accessories: EQ 25/5.6/18 with I 25/2.3/18 Cores [Электронный ресурс]. – URL: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/eq_25_5_6_18.pdf (дата обращения 05.12.2025).
14. TDK. Ferrites and accessories: SIFERRIT material N49 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/187212/c44cc4ec800e9f6f22a8068409c85b4f/pdf-n49.pdf> (дата обращения 05.12.2025).

REFERENCES LIST

1. Dinamicheskie poteri energii v kliuchevykh usiliteliakh moshchnosti v sostave gidroakusticheskogo peredaiushchego trakta / V. A. Aleksandrov, O. V. Vorobev, Iu. V. Kazakov, L. V. Markova // Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. – 2022. – T. 8, № 3. – S. 14-26. – DOI 10.31854/1813-324X-2022-8-3-14-26.
2. Grebennikov, A. Switchmode RF and microwave power amplifiers / A. Grebennikov, M. J. Franco // Academic Press, 2021. – 650 p. – ISBN 978-0-12-821769-8.
3. The class D audio power amplifier: A review / S. Mei [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, no. 19. – P. 3244. – DOI: 10.3390/electronics11193244.
4. Comparison of GaN, SiC, Si technology for high frequency and high efficiency inverters / S. K. Pullabhatla [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 184. – P. 01012. – DOI 10.1051/e3sconf/202018401012.
5. Otsenka modelei polevykh tranzistorov dlia shirokopolosnykh usilitelei klassa D / E. A. Kazakov, P. S. Ostapenkov, E. D. Solovev, A. V. Shchukin // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 4. – S. 35-46. – DOI 10.5281/zenodo.14514520. – EDN QTUBTR.
6. Issledovanie tsifrovyykh metodov generatsii signalov gidroakusticheskikh fazirovannykh antenykh reshetok / V. A. Aleksandrov, A. P. Buianov, L. V. Markova, M. A. Sivers // Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. – 2021. – T. 7, № 1. – S. 42-53. – DOI 10.31854/1813-324X-2021-7-1-42-53.
7. Section 4 – Power Transformer Design // Texas Instruments: – Seminar on Power Supply Design; SLUP126 [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf> (data obrashcheniia 05.12.2025).
8. Mohan, N. Power electronics, a first course: simulations and laboratory implementations / N. Mohan, S. Raju // John Wiley & Sons, 2022. – 432 p. – ISBN 978-1-119-89845-2.
9. LTspice XVII [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://agnd.net/valpo/341/LTspiceHelpXVII.pdf> (data obrashcheniia 05.12.2025).
10. Nonlinear transformer model for circuit simulation / J. H. Chan [et al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1991. – Vol. 10, no. 4. – P. 476–482. – DOI: 10.1109/43.75689.
11. Jiles, D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61, no. 1–2. – P. 48–60. – DOI 10.1016/0304-8853(86)90066-1.
12. For LTspice users: libraries of models, examples, etc [Elektronnyi resurs]. – URL: <http://bordodynov.ltwiki.org/> (data obrashcheniia 05.12.2025).
13. TDK. Ferrites and accessories: EQ 25/5.6/18 with I 25/2.3/18 Cores [Elektronnyi resurs]. – URL: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/eq_25_5_6_18.pdf (data obrashcheniia 05.12.2025).
14. TDK. Ferrites and accessories: SIFERRIT material N49 [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/187212/c44cc4ec800e9f6f22a8068409c85b4f/pdf-n49.pdf> (data obrashcheniia 05.12.2025).

Поступила в редакцию 11.12.2025 г., рекомендована к изданию 22.01.2026 г.

MULTICHANNEL D CLASS AMPLIFIER MODELING FOR WIDEBAND HYDROACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEMS

Kazakov E.A., Ostapenkov P.S., SHCHukin A.V., Filatov V.A., Gusev A.IU.

The paper presents the computer model of multi-channel D class switching amplifier. Those amplifiers use pulse-width modulation (PWM) signal as the input. The paper describes requirements for the PWM signal and switching speed of the amplifier elements. Especial attention is given to calculation and modeling the output transformer nonlinear effects in multi-channel switching amplifiers. It is shown that adding a second amplification channel reduce the amplitude of parasitic spectral components in PWM signal. The obtained results can be used for hydroacoustic communication systems development.

Keywords: switching power amplifiers, D class amplifiers, pulse-width modulation, SPICE models, ultra-wide band signals.

Казakov Евгений Александрович

аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: KazakovYevA@mpei.ru

Kazakov Evgenii Aleksandrovich

Postgraduate Student at Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.
ORCID: 0009-0000-8840-5384

Остапенков Павел Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: OstapenkovPS@mpei.ru

Ostapenkov Pavel Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute.
Russian Federation, Moscow.

Щукин Александр Викторович

старший преподаватель кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: ShchukinAV@mpei.ru

SHCHukin Aleksandr Viktorovich

Senior Lecturer at Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

Филатов Виктор Александрович

старший преподаватель кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: FilatovVA@mpei.ru

Filatov Viktor Aleksandrovich

Senior Lecturer at Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

Гусев Александр Юрьевич

аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: GusevAIYur@mpei.ru

Gusev Aleksandr IUrevich

Postgraduate Student at Department of Formation and Processing Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

**VARISTOR EFFECT WITH SMALL NONLINEARITY COEFFICIENT IN THE
«METAL-TO-CARBON FILM» CONTACT JUNCTIONS**

© 2026 *SHalaev R.V., Izotov A.I., Variukhin V.N.*

A varistor effect is detected during measurements of the current-voltage characteristics (CVC) of “metal-to-carbon film” contact junctions. Carbon films in such samples were grown using magnetron sputtering of graphite in an inert atmosphere onto metal substrates. Since the films exhibit temperature behavior of resistance characteristic of semiconductor materials, the result was a metal-semiconductor contact junction. Electrical measurements demonstrate nonlinear symmetrical CVC-characteristics of the junctions, typical for the varistor effect with low classification voltages and a small nonlinearity coefficient.

Keywords: carbon films, metal-semiconductor contact junction, current-voltage characteristics, varistor effect.

Introduction. The formation of symmetrical nonlinear current-voltage characteristics in inhomogeneous semiconductor materials and composites is a promising task in modern electronic materials science. In turn, the use of modern composite materials to form electronic nonlinear elements (varistors), whose electrical conductivity depends on the applied voltage, is a pressing area of microelectronics development.

It should be noted, that the varistor effect (changing in the conductivity of single-crystal or polycrystalline semiconductor elements when exposed to an electric field) typically occurs at relatively high voltages (hundreds of volts). This may significantly limit the applicability of varistors in electronics for power generation applications (limiting only high voltages and surge breakdowns), while ignoring low-voltage micro- and nanoelectronics.

Therefore, the development of next-generation varistor devices based on modern nanocomposite materials (semiconductors, polymers, ceramics, etc.) is a highly promising area, both as the patterns determination of bipolar conductivity formation in such materials and the relationship between the main varistor characteristics and the parameters of the composite matrix used.

The so-called varistor effect (having properties similar to the operation of an array of series- and parallel-connected p-n junctions) is caused with the presence of a certain granular structure of the material. The size of granules, typically tens of micrometers in size, is crucial. The typical granule size directly influences the varistor's characteristics. It is well known that carbon (in particular, nanostructured carbon) has considerable potential for use in electronics [1], since under certain conditions it combines a dielectric, a conductor and a semiconductor, which makes the material unique. Therefore, the use of nanostructured carbon materials as a working substance can bring new possibilities to the development of new types of varistor devices with unique properties. In particular, it is possible to obtain cluster carbon structures with characteristic structural element sizes of hundreds (or even tens) of nanometers (rather than micrometers, as noted above) directly during the process of gas-phase film deposition. There are known works [2, 3] on the study of the varistor effect in thin polycrystalline diamond films, with a mosaic structure size not exceeding a few micrometers.

This paper presents the results of resistometric studies of “metal-to-carbon film” contact junctions, demonstrating the presence of symmetrical nonlinear current-voltage characteristics at voltages of several volts, typical for the varistor effect.

Experimental technique. Samples for the study were obtained by magnetron sputtering of graphite in an argon atmosphere (see also [4]). Carbon films were deposited on substrates of various metals (titanium, steel, etc.) and glass substrates. Plasma was generated using a planar DC magnetron with a flat cathode and an annular anode. Sample deposition conditions were as follows: chamber gas pressure of 150 mTorr, film growth time of 40 min, substrate temperature of 350°C, and magnetron current of 40 mA.

The primary method for studying the varistor effect is measuring the current-voltage characteristics. The electrical properties of the resulting samples were studied using the resistometric method under normal conditions. Conductivity and current-voltage characteristics were measured at the contact junction in the "metal substrate–carbon film–measuring contact" structure in the voltage range from -5 V to +5 V. On the film side, the brass pin contact with a rounding $R \sim 0.2$ mm was used. The temperature dependences of the resistance of carbon films deposited on glass substrates were also studied using the two-probe method in a heat chamber in the temperature range from room temperature to 150°C.

Main results and discussion. As previously demonstrated in [5, 6], a study of nucleation processes during the gas-phase growth of carbon films reveals a cluster-like nature of carbon deposition during magnetron sputtering. It is discovered that nanometer-sized carbon clusters, already formed in the plasma, are deposited on the substrate surface, from which certain nanostructures are formed.

The formation of such clusters in our case is caused with the relatively high buffer gas pressure [6] – approximately 150 mTorr. As a result, a relatively high density of sputtered atoms is observed within a small plasma zone. This leads to self-organization processes, namely, the formation of clusters from the target material in the magnetron plasma, being triggered even at a fairly moderate discharge temperature.

When the cluster flow hits a substrate that remains relatively cool compared to the plasma and cluster temperatures, they "freeze," simultaneously transferring thermal energy to the substrate. Figure 1 shows the globular/granular structure of the carbon film, with characteristic element (globule) sizes of tens to hundreds of nanometers. It is evident from the figure that small globules tend to aggregate into larger globular formations measuring ~ 250 nm.

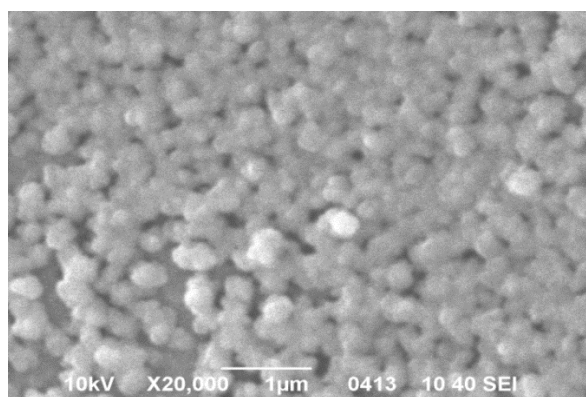


Fig. 1. SEM image of the globular structure of the carbon film

As can be seen from fig. 2a, the temperature dependence of the resistance of the obtained carbon films has a classic semiconductor character: the resistance decreases with increasing temperature ($dR/dT < 0$). That is, the material has a negative temperature coefficient of resistance (TCR). It should be noted that a negative TCR is also typical for classical varistor structures. The temperature dependence of the resistance of the "metal-to-carbon film" contact junction also decreases monotonically with increasing temperature (see fig. 2b),

since the carbon film makes an overwhelming contribution to the resistance of the resulting junction, and the total TCR of the contact junction is negative too. For example, the TCR of the obtained titanium-carbon film contact is -0.0073 C^{-1} , and that of the steel-carbon film contact is -0.0064 C^{-1} . Thus, it is obvious that as a result of the experiment, metal-semiconductor contact junctions were obtained (where a carbon film is the semiconductor, with an estimated band gap of $\sim 0.2\text{-}0.3\text{ eV}$ [4]).

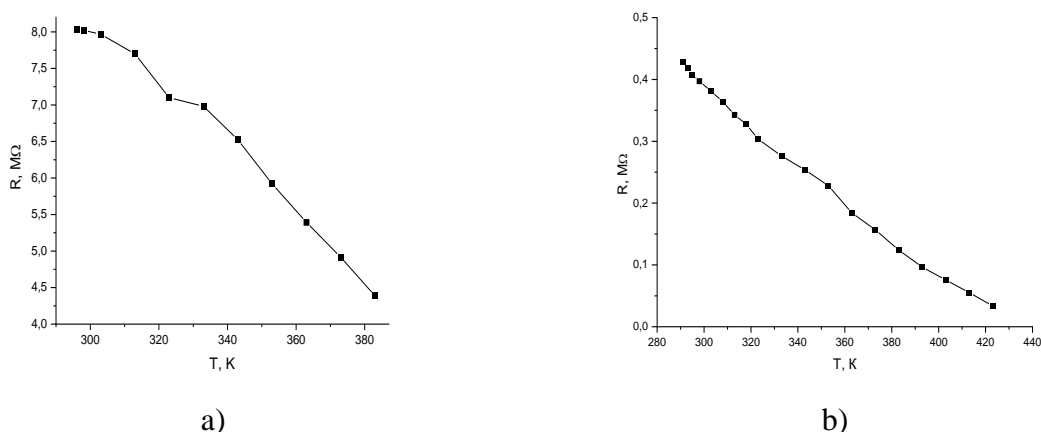


Fig. 2. Temperature dependence of the resistance of the carbon film on a glass substrate (a) and the “titanium-carbon film” contact junction (b)

Figure 3 shows the current-voltage characteristics of the “steel-carbon film” and “titanium-carbon film” contacts under normal conditions. It is evident that the current-voltage characteristics have a symmetrical nonlinear dependence, typical for an ohmic contact (there is no potential barrier in the contact, or it is tunnel-transparent for electrons). It should be noted that a similar type of CVC is typical for samples of natural glassy carbon (shungite) from certain industrial deposits [7]. This shape of the curve indicates the presence of a varistor effect in the obtained samples at fairly low voltages. The estimated classification voltage (at the current of 1 mA through the sample) is $\sim 0.9\text{ V}$ for the “steel-carbon film” contact junction and $\sim 1.4\text{ V}$ (estimated by extrapolation) for the “titanium-carbon film” contact junction.

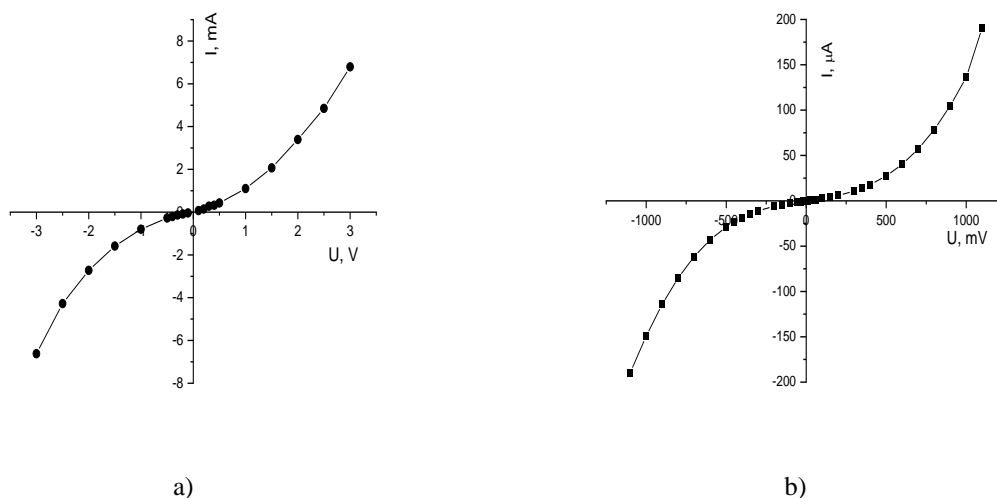


Fig. 3. Current-voltage characteristics of the “steel-carbon film” contact junction (a) and the “titanium-carbon film” contact junction (b)

An important parameter of varistors is the nonlinearity coefficient, defined as the ratio of static resistance to dynamic resistance for the same point of the current-voltage characteristic: $\lambda = R/R_d = U/I \cdot dI/dU$. The nonlinearity coefficient affects the varistor's operation, in particular, it determines the protective properties of the device during a sharp voltage increase. The nonlinearity coefficient λ can be determined by measuring the values of currents I_1 and I_2 , flowing through the varistor at two known voltage values U_1 and U_2 : $\lambda = \lg(I_2/I_1) / \lg(U_2/U_1)$. The nonlinearity coefficients λ of the current-voltage characteristics of the obtained “steel-carbon film” and “titanium-carbon film” contact junctions are relatively small compared to classical varistor materials (varying from 2 to 100) and are, respectively, 1.84 and 2.95.

Regarding the mechanism of the varistor effect occurrence in such structures, it is necessary to note the possible role of the tunneling effect. In the absence of direct contact between carbon particles (globules), but with sufficiently small interparticle gaps, electron tunneling occurs through such gaps. This leads to the formation of a comprehensive conductive structure in the film matrix (primarily in the form of chains of contacting particles), formed by aggregates of carbon globules. Presumably, the dominant conductivity mechanism at low currents is the intercalation of impurity atoms into the interlayer space of graphene planes in the carbon globule, while the contribution of nanoscale structural features to charge transfer is insignificant [7].

The estimated low characteristic values of the classification voltage can be explained with the relatively small size of carbon globules (fractions of a micrometer) and, accordingly, the relatively large initial number of conductive channels between these carbon globules. Further research is planned also with variations in the thickness of deposited carbon films to study the possibility of controlling the magnitude of the classification voltage and the permissible current through the “metal-carbon film” contact.

Conclusion. Nonlinear symmetrical sections of the current-voltage characteristics of the studied “metal-to-carbon film” contact junction samples are detected. Such CVCs are typical for the varistor effect, with an estimated classification voltage of 1-2 V and small nonlinearity coefficient. Probably, the varistor effect is due to the globular structure of carbon films, where electrical conductivity is determined with conductive channels between carbon clusters/globules. At low voltages, the number of conductive channels is relatively small, and the conductivity dependence is ohmic. As the voltage increases, the probability of charge carrier tunneling between clusters increases, thereby increasing the number of conductivity channels and achieving a nonlinear conductivity dependence for the sample. Presumably, the proposed materials can be used as a working substance for the development and optimization of low-voltage varistors and other carbon-based electronic devices.

REFERENCES LIST

1. Shalayev, R. V. Application of carbon nanomaterials in semiconductor electronics / R. V. Shalayev, V. N. Varyukhin // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* – 2025. – 16(2). – P. 216–224. – DOI 10.17586/2220-8054-2025-16-2-216-224.
2. Samsonenko, S. N. Varistor effect in polycrystal diamond films / S. N. Samsonenko // *PHPT.* – 2025. – 35, №2. – P. 34-40.
3. The diamond varistor obtained by additive forming using a gas phase / S. A. Eremin, V. N. Anikin, A. M. Kolesnikova [et al.] // *Diamond and Related Materials.* – 2025. – 158. – P. 112691. – DOI 10.1016/j.diamond.2025.112691.
4. Shalayev, R. V. Electrical properties of “metal-carbon film” contact / R. V. Shalayev, A. I. Izotov, V. V. Syrotkin // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* – 2023. – 14(1). – P. 86–88. – DOI 10.17586/2220-8054-2023-14-1-86-88.

5. Low-temperature synthesis and structure of hybrid Ni@C nanomaterials obtained by reactive magnetron sputtering / M. I. Mokhnenko, V. N. Varyukhin, A. M. Prudnikov [et al.] // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2015. – 37, №6. – P. 741-750. – DOI 10.15407/mfint.37.06.0741.
6. Kashtanov, P. V. Magnetron plasma and nanotechnology / P. V. Kashtanov, B. M. Smirnov, R. Hippler // *Phys. Usp.* – 2007. – 50(5). – P. 455-488. – DOI 10.1070/PU2007v050n05ABEH006138.
7. Golubev, E. A. Electrophysical properties and structural features of shungite (natural nanostructured carbon) / E. A. Golubev // *Physics of the Solid State*. – 2013. – 55(5). – P. 1078–1086. – DOI 10.1134/S1063783413050107.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shalayev, R. V. Application of carbon nanomaterials in semiconductor electronics / R. V. Shalayev, V. N. Varyukhin // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* – 2025. – 16(2). – P. 216–224. – DOI 10.17586/2220-8054-2025-16-2-216-224.
2. Самсоненко, С. Н. Варисторный эффект в поликристаллических алмазных пленках / С. Н. Самсоненко // *Физика и техника высоких давлений*. – 2025. – Т. 35, № 2. – С. 34-40. – EDN QXOIL.
3. The diamond varistor obtained by additive forming using a gas phase / S. A. Eremin, V. N. Anikin, A. M. Kolesnikova [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2025. – 158. – P. 112691. – DOI 10.1016/j.diamond.2025.112691.
4. Shalayev, R. V. Electrical properties of “metal-carbon film” contact / R. V. Shalayev, A. I. Izotov, V. V. Syrotkin // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* – 2023. – 14(1). – P. 86–88. – DOI 10.17586/2220-8054-2023-14-1-86-88.
5. Low-temperature synthesis and structure of hybrid Ni@C nanomaterials obtained by reactive magnetron sputtering / M. I. Mokhnenko, V. N. Varyukhin, A. M. Prudnikov [et al.] // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2015. – 37, №6. – P. 741-750. – DOI 10.15407/mfint.37.06.0741.
6. Kashtanov, P. V. Magnetron plasma and nanotechnology / P. V. Kashtanov, B. M. Smirnov, R. Hippler // *Phys. Usp.* – 2007. – 50(5). – P. 455-488. – DOI 10.1070/PU2007v050n05ABEH006138.
7. Golubev, E. A. Electrophysical properties and structural features of shungite (natural nanostructured carbon) / E. A. Golubev // *Physics of the Solid State*. – 2013. – 55(5). – P. 1078–1086. – DOI 10.1134/S1063783413050107.

Поступила в редакцию 12.12.2025 г., рекомендована к изданию 26.01.2026 г.

**ВАРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ С МАЛЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ В
КОНТАКТНЫХ ПЕРЕХОДАХ “МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНАЯ ПЛЕНКА”**

Шалаев Р.В., Изотов А.И., Варюхин В.Н.

Обнаружен варисторный эффект при измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) контактных переходов «металл-углеродная плёнка», в которых пленки выращивались методом магнетронного распыления графита в инертной атмосфере на металлические подложки. Поскольку температурное поведение сопротивления пленок характерно для полупроводниковых материалов, в результате получен контактный переход металл–полупроводник. Электрические измерения демонстрируют нелинейные симметричные ВАХ переходов, характерные для варисторного эффекта с невысокими значениями классификационного напряжения и малым коэффициентом нелинейности.

Ключевые слова: углеродные пленки, контакт металл-полупроводник, вольт-амперные характеристики, варисторный эффект.

Шалаев Ростислав Валериевич

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: sharos@donfti.ru

SHalaev Rostislav Valerievich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Scientist of Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0003-1258-2434

Изотов Анатолий Иванович

младший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: izotov.anatoli@gmail.com

Izotov Anatolii Ivanovich

Junior Researcher of Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Варюхин Виктор Николаевич

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: office@donfti.ru

Variukhin Viktor Nikolaevich

Corresponding Member RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Chief Researcher of Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0001-7717-8745

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ НА ОСНОВЕ ISOLATION FOREST В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

© 2026 Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Исаева Ю.Д.

В данной работе представлена разработка алгоритма автоматизированного обнаружения промышленных выбросов на основе метода машинного обучения Isolation Forest, интегрированного в информационно-измерительную систему мониторинга атмосферного воздуха. Рассматриваются теоретические основы метода, его архитектура и алгоритм работы с данными от стационарных датчиков. Описана структурная схема интеграции алгоритма в систему мониторинга для обеспечения оперативного реагирования.

Ключевые слова: обнаружение выбросов, аномалии, машинное обучение, Isolation Forest, экологический мониторинг, атмосферный воздух, промышленные выбросы, алгоритм, информационно-измерительная система.

Введение. Обеспечение экологической безопасности и контроль атмосферного воздуха в условиях интенсивно развивающихся промышленных территорий является одной из ключевых задач устойчивого развития. Согласно федеральному законодательству, предприятия I категории обязаны оснащать источники выбросов автоматическими средствами измерения и учёта [1]. Данные системы должны обеспечивать непрерывный автоматизированный контроль за концентрациями загрязняющих веществ в выбросах; автоматизированный учёт объёмов загрязнений, поступающих в атмосферу; достоверную фиксацию и оперативную передачу полученных данных в единую государственную информационную систему. Эта законодательная инициатива преследует несколько ключевых целей:

1. Формирование объективной и полной картины антропогенной нагрузки на атмосферный воздух, основанной на актуальных и точных измерениях.
2. Повышение открытости и прозрачности природоохранной деятельности промышленных предприятий как для контролирующих органов, так и для общественности.
3. Создание инструментальной основы для принятия эффективных управленческих решений, направленных на последовательное снижение вредных выбросов.
4. Обеспечение долгосрочной охраны здоровья населения и устойчивости природных экосистем за счёт предупреждения и контроля промышленного загрязнения.

Актуальность разработки автоматизированных систем производственного экологического мониторинга. За последние годы в области экологического контроля наблюдается значительный прогресс, связанный с развитием новых технологий и усовершенствованием существующих методов измерения. Автоматизированные системы производственного экологического мониторинга (АС ПЭМ) являются передовыми технологическими комплексами, предназначенными для непрерывного

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.

контроля и учёта концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Данные системы интегрируют в себя комплекс аппаратных средств (газоанализаторы, пробоотборники, датчики), специализированное программное обеспечение и алгоритмы автоматической обработки данных.

Функциональное ядро АС ПЭМ формируется за счет синергетического объединения трёх взаимодополняющих компонентов: высокоточных аппаратных средств отбора проб и анализа (газоанализаторы, пробоотборные устройства, датчики физических параметров), специализированного программного обеспечения с расширенными аналитическими возможностями и сложных алгоритмов автоматизированной обработки данных, функционирующих в режиме реального времени. Такая архитектура позволяет осуществлять трансформацию первичных измерений в оперативно значимую информацию, формируя замкнутый цикл «измерение – анализ – управление». Несмотря на техническое оснащение, остаётся острой проблема оперативного и достоверного выявления именно аномальных выбросов – кратковременных, но значительных превышений нормативов, которые часто маскируются в общем потоке данных, могут быть связаны с нештатными ситуациями на производстве, нарушениями технологического режима или скрытыми источниками загрязнения. Зачастую эти аномальные явления коррелируют с нештатными или аварийными ситуациями на производстве, внезапными нарушениями установленного технологического режима, скрытыми или неучтёнными источниками загрязнения, а также могут быть следствием запуска или остановки отдельных агрегатов.

Традиционные системы мониторинга, ориентированные преимущественно на фиксацию и усреднение показателей, зачастую оказываются недостаточно чувствительными для улавливания подобных быстротечных, но потенциально опасных событий, что создаёт пробелы в системе экологической безопасности и затрудняет оперативное принятие корректирующих мер. Машинное обучение и методы искусственного интеллекта [2, 3], такие как нейронные сети и ансамблевые алгоритмы, становятся ключевыми инструментами в системах экологического мониторинга. Они предоставляют возможности для обучения на исторических данных и классификации аномалий по их природе. Однако высокая точность нейронных сетей зачастую сопряжена со значительными вычислительными затратами, что может затруднять их использование в задачах, требующих обработки данных в режиме реального времени. Масштабные вычислительные затраты, обусловленные необходимостью выполнения операций с многомиллионными матрицами параметров через множество слоёв, порождают проблему их практического внедрения в приложениях, чувствительных к временным задержкам. В таких сценариях более предпочтительными становятся менее ресурсоемкие, но эффективные алгоритмы. В данном контексте Isolation Forest (IF) представляет собой важную альтернативу. Принцип работы этого алгоритма основан на последовательном случайном разбиении пространства данных для быстрой изоляции отдельных наблюдений. Экземпляры, которые можно отделить от основной массы данных за меньшее количество шагов, считаются аномальными. Такой подход делает Isolation Forest особенно эффективным для обнаружения редких и экстремальных выбросов, характерных, например, для аномальных промышленных выбросов, кибератак или критических сбоев в работе оборудования, и позволяет ему работать быстро даже на больших наборах данных [4].

На важность данного исследования влияют нескольких ключевых факторов:

- технологический и методологический – традиционные пороговые методы не справляются с большими объёмами многомерных данных, порождая ложные срабатывания и пропуская сложные аномалии. Тяжёлые модели (нейросети) требуют много ресурсов;

- экологический и социальный – необходимость выявления аномалий для предотвращения ущерба экосистемам и здоровью людей, а также для оптимизации затрат предприятий на экологические платежи.

Метод Isolation Forest позволяет решать две взаимосвязанные задачи: ретроспективный анализ – идентификация уже произошедших аномальных выбросов в исторических данных; проактивный мониторинг – обнаружение потенциально опасных тенденций и паттернов в реальном времени [5, 6].

Таким образом, тема исследования является актуальной, так как она напрямую отвечает на современные вызовы в области экологического контроля, объединяя законодательные требования, технологические возможности и практические потребности охраны окружающей среды.

Структура и принципиальная схема АС ПЭМ промышленных выбросов. АС ПЭМ – это современные технологические комплексы для круглосуточного наблюдения за содержанием вредных веществ в выбросах промышленных источников. Эти системы интегрируют высокоточные измерительные приборы, каналы передачи данных и специализированное программное обеспечение с автоматизированными алгоритмами анализа. Такой подход обеспечивает стабильное получение достоверной информации о составе выбросов с минимальной временной задержкой.

Структура АС ПЭМ включает три ключевых элемента:

- измерительный блок: датчики и анализаторы для определения концентрации специфических загрязнителей. Он выполняет роль сенсорного интерфейса между физико-химическими процессами в газовом потоке и цифровой средой обработки данных. Основная задача блока заключается в осуществлении непрерывного измерения концентраций целевых загрязнителей;

- коммуникационный блок: оборудование для сбора, обработки и передачи измерительной информации. Блок служит технической основой для консолидации, первичной обработки и трансляции информационных потоков от распределенных точек измерения к централизованным узлам анализа. Его ключевая функция заключается в обеспечении целостности и безошибочности передачи измерительной информации в условиях возможных помех, температурных колебаний и других эксплуатационных воздействий;

- аналитический блок: программное обеспечение для анализа данных, их визуализации и формирования отчетов. Реализуемый в виде специализированного программного обеспечения, этот блок выполняет статистическую обработку данных, сравнение текущих показателей с установленными предельно допустимыми нормативами, автоматическое формирование протоколов измерений и установленной государственной отчетности.

Ключевым преимуществом является высокая степень автоматизации, что позволяет устранить влияние человеческого фактора, увеличить частоту и воспроизводимость измерений, а также осуществлять контроль в режиме реального времени. Автоматизация обеспечивает возможность проведения измерений с недостижимой при ручных методах частотой, вплоть до непрерывного режима, что критически важно для захвата быстропротекающих процессов и аномальных событий.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема работы АС ПЭМ промышленных выбросов.

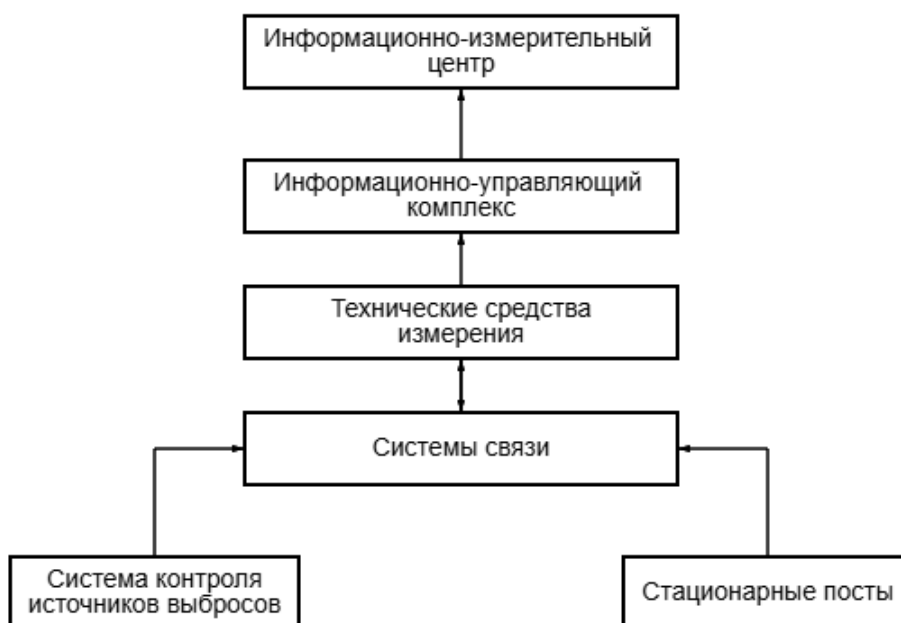


Рис. 1. Принципиальная схема АС ПЭМ промышленных выбросов

Работа автоматизированных систем измерения выбросов осуществляется в несколько этапов:

1. На входе системы устанавливаются датчики и приборы, которые фиксируют концентрацию загрязняющих веществ в выбросных потоках. В зависимости от типа системы используются оптические, электрохимические или масс-спектрометрические методы для определения состава и уровня загрязнений.

2. Полученные сигналы преобразуются в электронные данные и передаются в центральный блок обработки. В процессе измерений осуществляется самотестирование приборов для обеспечения высокой точности.

3. Центральное программное обеспечение системы обрабатывает поступающие данные, выполняет их фильтрацию, анализ и сравнение с установленными нормативами. В случае превышения допустимых уровней система автоматически фиксирует событие и формирует соответствующие отчеты.

4. Обработанные данные передаются в централизованные базы данных или системы управления.

5. Интерфейсы системы предоставляют оператору визуальные отчеты, графики и уведомления о текущем состоянии выбросов. Это позволяет оперативно реагировать на возможные нарушения экологических нормативов [7].

Применение алгоритма машинного обучения Isolation Forest в АС ПЭМ. АС ПЭМ обеспечивает сбор высокочастотных многомерных данных, но может пропускать слабовыраженные аномалии или наоборот генерировать ложные срабатывания из-за естественных колебаний технологического процесса. Для решения этой задачи в рамках АС ПЭМ перспективным является применение алгоритма машинного обучения Isolation Forest. Алгоритм Isolation Forest, интегрированный в автоматизированную

систему комплексного мониторинга выбросов от стационарных источников загрязнения, выполняет фильтрацию потока полученной информации, выделяя моменты, когда поведение системы начинает отклоняться от нормального паттерна, даже если все показатели по-прежнему находятся в разрешенных пределах. На рисунке 2 представлена структурная схема автоматизированной системы комплексного мониторинга выбросов от стационарных источников загрязнения.

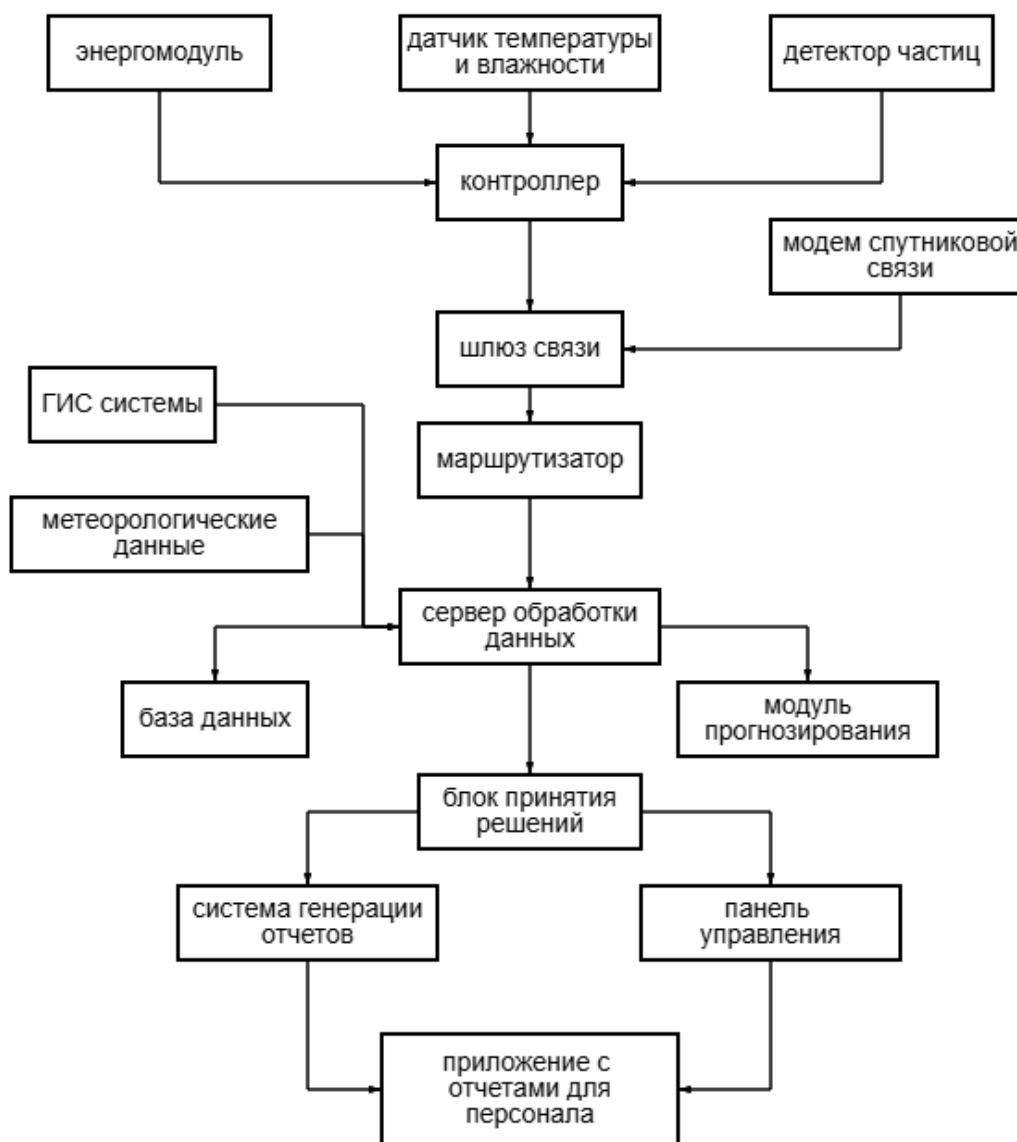


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной системы комплексного мониторинга выбросов от стационарных источников загрязнения

Формируется комплексный набор признаков, включающий абсолютные значения концентраций загрязняющих веществ, их динамические характеристики, метеорологические параметры и временные метки. Алгоритм последовательно обрабатывает данные в скользящих временных окнах продолжительностью от 15 до 60 минут, вычисляя для каждого интервала показатель аномальности. Метод Isolation Forest применяется для первичного обнаружения аномальных выбросов загрязняющих

веществ в системе мониторинга. IF обеспечивает высокую эффективность при работе с многомерными данными от датчиков, включая концентрации загрязнителей и метеопараметры. В рамках данной задачи IF определяется как неконтролируемая и непараметрическая модель, оптимально подходящая для обнаружения редких событий - аномальных выбросов [8].

Постановка задачи заключается в разработке автоматизированной системы, способной обнаруживать аномальные выбросы загрязняющих веществ в атмосфере и точно определять их происхождение.

Теоретической основой решения являются методы распознавания образов и статистического анализа временных рядов. Множество стационарных источников $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ представляет собой дискретное пространство объектов наблюдения, где каждый источник характеризуется уникальным набором физико-химических параметров. Система мониторинга $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ формирует многомерные временные ряды $Y_n(t)$, содержащие скрытые паттерны, соответствующие нормальным и аномальным режимам работы источников.

Для эффективного применения алгоритмов машинного обучения, в частности, для обнаружения аномалий, исходные данные наблюдений должны быть преобразованы в структурированное признаковое пространство. Это пространство формируется для каждого анализируемого момента времени t на основе временного окна $[t - \Delta t, t]$ и формирует вектор признаков:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)].$$

Формирование вектора признаков представляет собой междисциплинарную задачу, объединяющую принципы анализа временных рядов, физики атмосферы и цифровой обработки сигналов. В состав признакового пространства включаются:

Абсолютные концентрации: $C_n(t)$ базовый признак количественно описывает текущий уровень содержания загрязняющих веществ в точке измерения, отражая непосредственное физико-химическое состояние воздушной среды.

Временные производные: dC_n / dt характеризуют скорость и направление изменения концентраций, что позволяет улавливать резкие подъемы (начало выброса) или спады, которые не видны при анализе только абсолютных значений.

Метеопараметры: скорость ветра $u(t)$, направление $\varphi(t)$ системно учитывает внешние атмосферные воздействия на процессы рассеивания и трансформации загрязняющих веществ.

Скользящие статистики: для учета краткосрочной изменчивости и фонового уровня в признаковое пространство включаются скользящие средние $\mu_n(t)$ и скользящие стандартные отклонения $\sigma_n(t)$, рассчитанные в пределах того же временного окна. Эти статистики позволяют алгоритму сравнивать текущее состояние с локальной нормой.

Алгоритм Isolation Forest. Фаза обучения:

1. Строится ансамбль из T деревьев изоляции, каждое дерево обучается на случайной подвыборке исходных данных. Процесс построения – рекурсивный выбор признака и порогового значения для разделения данных до тех пор, пока каждая точка (или группа схожих точек) не будет изолирована в отдельном листе дерева.

2. Каждое дерево обучается на случайной подвыборке $\varphi \subset X$ размера φ .

Фаза оценки: для наблюдения x вычисляется путь $h(x)$ – количество ребер от корня до терминального узла.

Показатель аномальности:

$$S(x, n) = 2^{(-E[h(x)]/c(n))},$$

где $E[h(x)]$ – средняя длина пути по всем деревьям; $c(n) = 2H(n-1) - 2(n-1)/n$ – нормирующая константа; $H(k)$ – гармоническое число: $H(k) \approx \ln(k) + \gamma$.

Правило обнаружения:

$$\text{выброс} = \{1, \text{ если } s(x, n) > \Theta; 0, \text{ иначе}\},$$

где $\Theta = 0.65$ – пороговое значение.

Значение $s(x, n)$ находится в диапазоне от 0 до 1. Если $s(x, n)$ близко к 1, это указывает на высокую вероятность того, что наблюдение x является аномалией (его легко изолировать). Isolation Forest предоставляет количественную и интерпретируемую оценку аномальности $s(x, n)$. Это позволяет не только классифицировать событие, но и ранжировать потенциальные инциденты по степени их отклонения от нормы, что критически важно для определения приоритетов реагирования. Нормировка с помощью константы $c(n)$ обеспечивает корректное сравнение результатов для наборов данных разного объема.

Выводы. Преимуществом предложенного алгоритма является его способность к раннему обнаружению нештатных ситуаций. Путем анализа многомерного признакового пространства, включающего не только абсолютные концентрации загрязняющих веществ, но и их динамику, алгоритм выявляет сложные паттерны и слабые сигналы, предшествующие значительным превышениям. В основу алгоритма положен принцип изоляции аномалий: редкие и отличающиеся от нормы точки данных могут быть отделены в пространстве признаков за меньшее количество случайных разбиений. Это ключевое свойство делает Isolation Forest особенно подходящим для работы с многомерными временными рядами загрязняющих веществ. Как и любой метод, алгоритм имеет границы применимости. Его эффективность может снижаться при работе с высокоразмерными данными, однако различного рода ограничения очерчивают направления для дальнейшего развития.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и статьи 1 и 5 Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в части создания систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ: Федеральный закон от 29.07.2018 г. № 252 ФЗ.
2. Решение задач информационной безопасности с использованием искусственного интеллекта / А. В. Скрыпников, В. В. Денисенко, Е. Г. Хитров [и др.] // Современные наукоёмкие технологии. – 2021. – № 6-2. – С. 277–281. – DOI 10.17513/snt.38734. – EDN LMFNLR.
3. Панарин, В. М. Совершенствование информационно-измерительных и управляющих систем мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий / В. М. Панарин, А. А. Маслова, О. В. Гришакова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 5-17. – DOI 10.5281/zenodo.17394796. – EDN BSMCQX.

4. Автоматизированная система обеспечения экологической безопасности объектов захоронения твердых коммунальных отходов при завершении эксплуатации / В. М. Панарин, А. А. Маслова, А. Н. Коваленко, В. А. Браун // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29. – № 8. – С. 38-43. – DOI 10.18412/1816-0395-2025-8-38-43. – EDN YYMPRA.
5. Обнаружение аномалий в энергосистемах: применение модели isolation forest для выявления киберугроз / С. В. Кочергин, С. В. Артемова, А. А. Бакаев [и др.] // Безопасность информационных технологий. – 2025. – Т. 32. – С. 112–121. – DOI 10.26583/bit.2025.1.07.
6. Santosuosso, U. Tracing outliers in the dataset of *Drosophila suzukii* records with the Isolation Forest method / U. Santosuosso, A. Cini, A. Papini // Journal of Big Data. – 2020. – V.7(14). – URL: <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00288-8>. – DOI 10.1186/s40537-020-00288-8.
7. Толстых, А. В. Комплексная автоматизированная система экологической и промышленной безопасности опасных производственных объектов / А. В. Толстых, И. В. Партанский, М. И. Таджиев // Экологическая безопасность в газовой промышленности (ESGI 2015): тезисы докладов IV Международной конференции, Москва, 02–03 декабря 2015 года. – Москва: ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», 2015. – С. 62. – EDN YYUZHf.
8. Charles, J. Isolation Forest with Optimal Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Water Quality Prediction and Classification Model / J. Charles, G. Vinodhini, R. Nagarajan // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2020. – №11(11). – P. 159-176. – DOI: 10.34218/IJARET.11.11.2020.015.

REFERENCES LIST

1. О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и статьи 1 и 5 Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в части создания систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ: Федеральный закон от 29.07.2018 г. № 252 ФЗ.
2. Решение задач информационной безопасности с использованием искусственного интеллекта / А. В. Скряпников, В. В. Денисенко, Е. Г. Хитров [и др.] // Современные наукоёмкие технологии. – 2021. – № 6-2. – С. 277–281. – DOI 10.17513/snt.38734. – EDN LMFNLR.
3. Панарин, В. М. Совершенствование информационно-измерительных и управляющих систем мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий / В. М. Панарин, А. А. Маслова, О. В. Гришакова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 5-17. – DOI 10.5281/zenodo.17394796. – EDN BSMCQX.
4. Автоматизированная система обеспечения экологической безопасности объектов захоронения твердых коммунальных отходов при завершении эксплуатации / В. М. Панарин, А. А. Маслова, А. Н. Коваленко, В. А. Браун // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29. – № 8. – С. 38-43. – DOI 10.18412/1816-0395-2025-8-38-43. – EDN YYMPRA.
5. Обнаружение аномалий в энергосистемах: применение модели isolation forest для выявления киберугроз / С. В. Кочергин, С. В. Артемова, А. А. Бакаев [и др.] // Безопасность информационных технологий. – 2025. – Т. 32. – С. 112–121. – DOI 10.26583/bit.2025.1.07.
6. Santosuosso, U. Tracing outliers in the dataset of *Drosophila suzukii* records with the Isolation Forest method / U. Santosuosso, A. Cini, A. Papini // Journal of Big Data. – 2020. – V.7(14). – URL: <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00288-8>. – DOI 10.1186/s40537-020-00288-8.
7. Толстых, А. В. Комплексная автоматизированная система экологической и промышленной безопасности опасных производственных объектов / А. В. Толстых, И. В. Партанский, М. И. Таджиев // Экологическая безопасность в газовой промышленности (ESGI 2015): тезисы докладов IV Международной конференции, Москва, 02–03 декабря 2015 года. – Москва: ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», 2015. – С. 62. – EDN YYUZHf.
8. Charles, J. Isolation Forest with Optimal Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Water Quality Prediction and Classification Model / J. Charles, G. Vinodhini, R. Nagarajan // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2020. – №11(11). – P. 159-176. – DOI: 10.34218/IJARET.11.11.2020.015.

Поступила в редакцию 12.12.2025 г., рекомендована к изданию 04.02.2026 г.

ALGORITHM FOR DETECTING EMISSIONS BASED ON ISOLATION FOREST IN THE
ATMOSPHERIC AIR MONITORING SYSTEM

Panarin V.M., Maslova A.A., Ryleeva E.M., Isaeva I.U.D.

This paper presents the development of an automated algorithm for detecting industrial emissions based on the Isolation Forest machine learning method, which is integrated into the atmospheric air monitoring information and measurement system. The theoretical foundations of the method, its architecture, and the algorithm for working with data from stationary sensors are discussed. The paper describes a structural scheme for integrating the algorithm into a monitoring system to ensure prompt response.

Keywords: emission detection, anomalies, machine learning, Isolation Forest, environmental monitoring, atmospheric air, industrial emissions, algorithm, information and measurement system.

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.
ORCID: 0000-0002-0431-3640

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.
ORCID: 0000-0001-5974-3800

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.
ORCID: 0009-0001-6442-6970

Исаева Юлия Дмитриевна

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

Isaeva Iuliia Dmitrievna

Postgraduate Student at Department of Labor and the
Environmental Protection of Tula State University,
Russian Federation, Tula.
ORCID: 0009-0008-5230-0562

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN OFPPNX
УДК 681.5.015.3

DOI 10.5281/zenodo.19201811

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ИДЕНТИФИКАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ НА ОСНОВЕ ЕГО ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2026 Лукьянов А.Д., Донской Д.Ю.

В данной работе приведены методики идентификации и моделирования термоэлектрических преобразователей на основе эффекта Пельтье. Методики состоят из алгоритмов математической оценки базы результатов ряда физических экспериментов над термоэлектрическим преобразователем при различных управляющих воздействиях и известных стационарных условиях окружающей среды. Применение описанных методик позволяет определить необходимые для моделирования и уникальные для каждого элемента Пельтье физические параметры. В ходе работы были идентифицированы параметры популярного на рынке элемента Пельтье ТЕС1-12706 и приведен анализ точности результатов математического моделирования на базе предложенных подходов.

Ключевые слова: элемент Пельтье, аппроксимация, МНК, параметрическая оптимизация.

Введение. Определение параметров термоэлектрического модуля (ТЭМ) Пельтье представляет собой базовую задачу при разработке точных математических моделей для автоматизированных систем управления, проектирования технологических процессов и оптимизации тепловых режимов. Степень адекватности математической модели непосредственно определяется корректностью ее параметрического описания, отражающего нелинейные и температурно-зависимые физические процессы, протекающие в рабочей зоне устройства. Предлагаемый алгоритм идентификации, реализованный в два этапа и основанный на полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов с последующей параметрической калибровкой в среде Simulink, демонстрирует современный научно-обоснованный подход к решению указанной проблемы. Для комплексного анализа данного метода необходимо рассмотреть его теоретические основы, включающие физические принципы функционирования ТЭМ и их формализованное математическое представление.

Функционирование термоэлектрического модуля базируется на трех фундаментальных физических явлениях: эффекте Пельтье, эффекте Зеебека и Джоулевым тепловыделением [1]. Эффект Пельтье представляет собой процесс переноса тепловой энергии через электрический контакт двух разнородных полупроводниковых материалов при прохождении постоянного электрического тока [2, 3]. Направление вектора теплового потока определяется полярностью тока: при положительной полярности наблюдается теплоспоглощение на одном контакте (режим охлаждения) и тепловыделение на противоположном (режим нагрева), при инверсии полярности тока данные процессы реверсируются [4, 5]. Коэффициент Пельтье (Π) определяется как количество теплоты, переносимое единичным электрическим зарядом, и является ключевым параметром, характеризующим данный эффект [6]. Его величина обусловлена свойствами полупроводниковых материалов (р-п переходы,

преимущественно на основе теллурида висмута, однако современные исследования показывают применимость и других материалов [5-11]) и температурным градиентом между контактирующими поверхностями [5, 12].

Эффект Зеебека проявляется как обратное физическое явление: при установлении температурного градиента между двумя разнородными проводниками возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), индуцирующая электрический ток в замкнутой цепи [13]. Коэффициент Зеебека (α) количественно характеризует величину индуцированной ЭДС и является взаимосвязанным параметром с коэффициентом Пельтье [14]. В контексте работы ТЭМ при протекании рабочего тока возникающая термо-ЭДС создает противодействующий потенциал внешнему источнику питания, что существенно влияет на результирующее напряжение на клеммах модуля.

Кроме указанных эффектов, в процессе функционирования ТЭМ значительное влияние оказывает Джоулево тепловыделение, возникающее при протекании электрического тока через материал с конечной удельной проводимостью [15]. Данный эффект неизбежно приводит к тепловому разогреву активной зоны элемента и служит основным фактором, ограничивающим эффективность термоэлектрических преобразователей в автоматизированных технологических системах [16, 17]. В рамках расширенных математических моделей также учитывается эффект Томсона, обусловленный переносом тепловой энергии в однородном проводнике при одновременном наличии температурного градиента и электрического тока [18, 19].

На основе фундаментальных физических закономерностей формируются математические соотношения, описывающие динамику тепловых и электрических процессов в ТЭМ. Центральным уравнением, устанавливающим взаимосвязь между электрическими и тепловыми параметрами, является выражение для напряжения на клеммах модуля:

$$V = \alpha \cdot (T_H - T_C) + I \cdot R,$$

где V – напряжение на клеммах, I – сила тока, α – коэффициент Зеебека (эквивалентный коэффициенту Пельтье), T_C и T_H – температуры холодной и горячей рабочих поверхностей соответственно, R – внутреннее активное сопротивление модуля [20]. Данное уравнение демонстрирует аддитивный характер напряжения, складывающегося из термо-ЭДС, обусловленной температурным перепадом, и омического падения напряжения на внутреннем сопротивлении.

Тепловой баланс на каждой рабочей поверхности ТЭМ описывается системой дифференциальных уравнений. Тепловые потоки Q_C на холодной поверхности «С – cold» и Q_H на горячей поверхности «Н – hot» могут быть представлены следующими соотношениями [20, 21]:

$$Q_C = \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + K \cdot (T_C - T_H),$$

$$Q_H = \alpha \cdot T_H \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + K \cdot (T_H - T_C),$$

здесь K – эффективный коэффициент теплопроводности ТЭМ, а составляющие отражают вклад эффекта Пельтье, Джоулева тепловыделения и теплопроводности по закону Фурье соответственно. Указанные уравнения составляют теоретическую основу для построения детализированных физико-математических моделей в специализированных программных пакетах, таких как Simscape.

Ключевым фактором, обеспечивающим высокую точность математического моделирования, является учет температурной зависимости всех основных параметров (α , R , K) [1, 13]. Пренебрежение данной зависимостью и применение постоянных значений параметров приводит к существенным погрешностям в расчетах, особенно при эксплуатации в условиях значительных температурных градиентов или в импульсных режимах управления [1-4, 20-23]. Экспериментальные исследования подтверждают, что электрическое сопротивление возрастает с повышением температуры вследствие усиления фоновое рассеяния носителей заряда [20-24], а коэффициент Зеебека также демонстрирует нелинейную зависимость от температуры [20-25]. Следовательно, для создания адекватной математической модели необходимо использовать температурно-зависимые функциональные зависимости для указанных параметров. На практике данные зависимости часто аппроксимируются полиномами второго порядка [20, 23].

Методы. Перед определением алгоритма анализа данных, необходимо их собрать при помощи испытательного стенда. В состав стенда входит микроконтроллер ESP32 для удаленного доступа по Wi-Fi, тонкопленочные термисторы MF55 NTC10K 1% (4 шт.), радиатор с детерминированными параметрами, лабораторный блок питания E3632 Keysight Technologies с RS-232. Структурная схема стенда представлена на рис. 1.

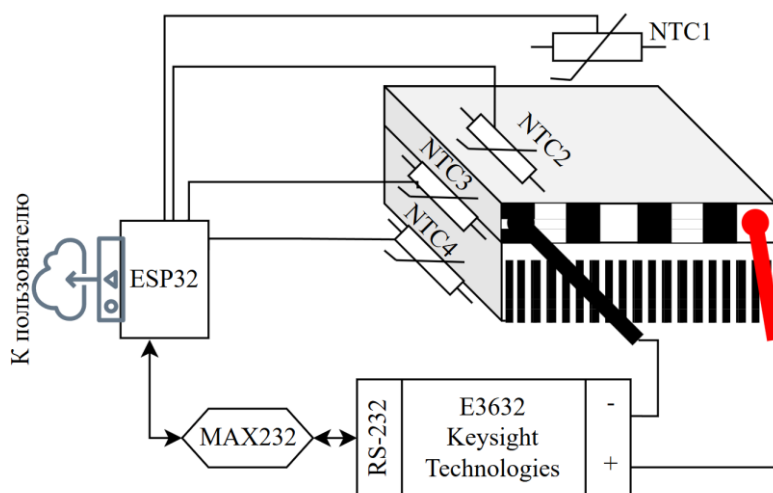


Рис. 1. Структура испытательного стенда

Для корректной записи данных о температуре, каждый термистор был откалиброван, их функциональные характеристики были внесены в программу микроконтроллера ESP32. Пример такой характеристики представлен на рис. 2. Для калибровки применили метод наименьших квадратов для функции первой степени (1):

$$f(x) = 3.32 \cdot x - 0.038. \quad (1)$$

Показатели качества аппроксимации: $SSE - 0.28$; $R^2 - 0.99$; $Adjusted R^2 - 0.99$; $RMSE - 0.059$. Данные токопотребления считываются напрямую с блока питания по интерфейсу RS-232, также происходит и автоматическое управление параметрами питающего тока и напряжения.

Процесс считывания и отправки пакета данных пользователю по Wi-Fi через UDP протокол происходит раз в секунду, поэтому запись времени, как отдельного массива данных не требуется. В пакет входят все рассчитанные температуры, токопотребление и напряжение питания.

Также стоит отметить необходимое условие проведения всех испытаний на стенде – это применение радиатора, способного обеспечить достаточную мощность теплоотведения или добавление системы активного охлаждения.

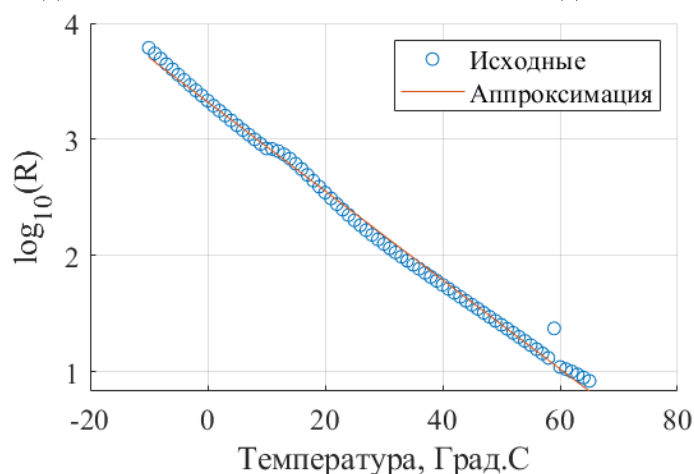


Рис. 2. Пример калибровочной функции при температуре от -10 до 70°C (R – сопротивление, Ом)

Алгоритм проведения испытания для сбора всех необходимых данных состоит из следующих этапов:

1. Установить напряжение питания 5В, ток не ограничивать;
2. Период сбора данных определяется исходя из времени установки переходных процессов. По экспериментам для образца ТЕС1-12706 при напряжениях от 3 до 12В время сбора варьировалось от 4 до 20 минут.
3. Отключить питание и дождаться уравнивания температур в системе с окружающей средой;
4. Установить напряжение питания 9В, ток не ограничивать;
5. Повторить пункт 2,3 данного алгоритма;
6. Установить напряжение питания 12В, ток не ограничивать;
7. Повторить пункт 2,3 данного алгоритма.
8. Можно продолжить сбор точек для получения большего набора данных при других рабочих напряжениях, главное применять правильное охлаждение для горячей стороны элемента Пельтье и учитывать пиковые нагрузки, чтобы образец не вышел из строя.

В результате испытания будет сформирована база данных. Пример переходных процессов по току для популярного на рынке образца ТЕС1-12706 в графическом виде представлен на рис. 3.

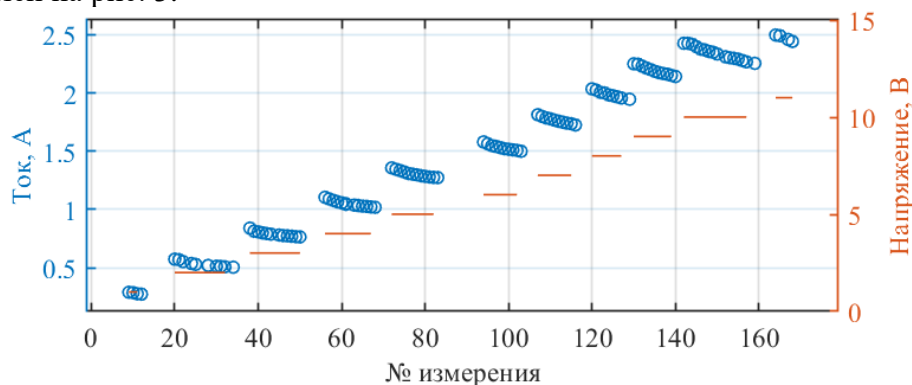


Рис. 3. Пример базы измерений тока и напряжения

Идентифицировать параметры Пельтье для составления его динамической модели можно как через нахождение внутреннего сопротивления, так и через определение его рабочей мощности при различных воздействующих факторах.

Таким образом, для первого варианта идентификации необходимо определить зависимость внутреннего сопротивления элемента Пельтье от питающего напряжения и разности температур на его сторонах. Для второго варианта необходимо определить зависимость текущей мощности элемента Пельтье от разности температур на его сторонах и напряжения.

В данной работе были получены обе зависимости, и проведено сравнение точности двух подходов. Оба подхода легли в основу идентификации кривых изменения теплопроводности и коэффициента Зеебека для разных сторон рассматриваемого элемента Пельтье. До вычисления аналитической функции по графикам на рис. 4 кажется, что мощность имеет меньший разброс между экспериментами (1) и (2) и даже опишется меньшей степенью полинома, однако результаты будут иными.

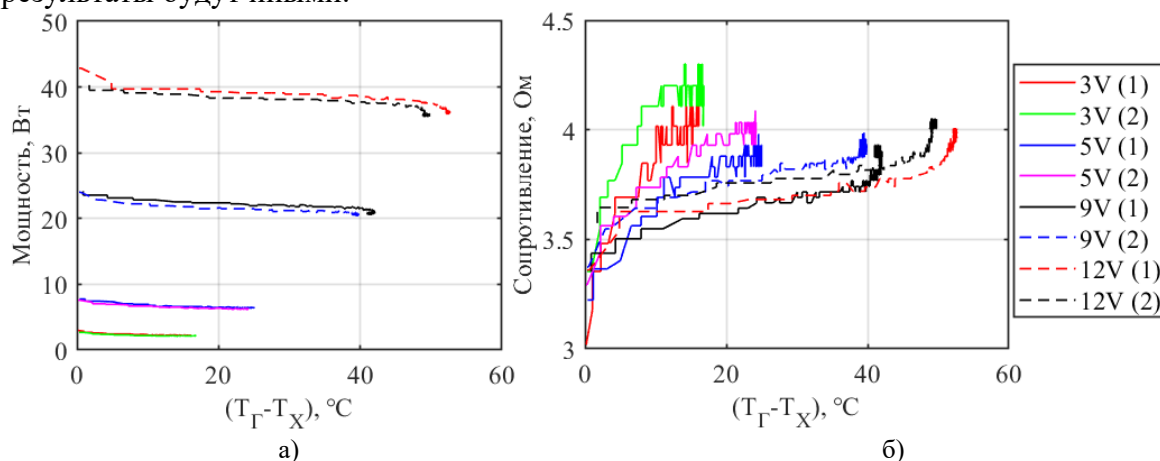


Рис. 4. Графики изменения мощности (а) и сопротивления (б) элемента Пельтье по двум экспериментам, которые обозначены (1) и (2) на легенде графиков

Для получения аналитического выражения, позволяющего рассчитать внутреннее сопротивление термоэлектрического преобразователя в зависимости от воздействий на него, необходимо рассмотреть совокупность данных нескольких экспериментов при различных начальных условиях по напряжению питания. Стационарным для каждого отдельного исследования по протоколу оставляем напряжение.

Применяя полиномиальную аппроксимацию методом наименьших квадратов (МНК), было определено уравнение оптимальной поверхности (2), описывающей внутренне сопротивление элемента Пельтье и его мощностную характеристику в следующих рабочих диапазонах: напряжение от 0 до 12 В, дельта температур от 0 до 54°C, при этом пиковый нагрев горячей стороны не превысил 54°C.

$$\begin{aligned}
 f(x) = & p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + \\
 & + p_{02} \cdot y^2 + p_{30} \cdot x^3 + p_{21} \cdot x^2 \cdot y + p_{12} \cdot x \cdot y^2 + p_{03} \cdot y^3 + \\
 & + p_{31} \cdot x^3 \cdot y + p_{22} \cdot x^2 \cdot y^2 + p_{13} \cdot x \cdot y^3 + p_{04} \cdot y^4.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Переменной «х» в уравнении (2) описывается напряжение питания (В), подаваемое на вход термоэлектрического преобразователя, а переменной «у» - разница между температурой горячей и холодной стороны в °C.

Коэффициенты данного уравнения и качество аппроксимации для описания мощности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (2) для мощности и показатели качества аппроксимации

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Качество
p_{00}	-0.2609	p_{21}	0.0026	SSE: 470.3 R^2 : 0.9993 Adjusted R^2 : 0.9992 RMSE: 0.3407
p_{10}	0.1628	p_{12}	$8.7558 \cdot 10^{-4}$	
p_{01}	0.0041	p_{03}	$-1.9295 \cdot 10^{-4}$	
p_{20}	0.2879	p_{31}	$-3.8564 \cdot 10^{-4}$	
p_{11}	-0.0436	p_{22}	$2.7012 \cdot 10^{-4}$	
p_{02}	0.0045	p_{13}	$-9.8027 \cdot 10^{-5}$	
p_{30}	$-2.7551 \cdot 10^{-4}$	p_{04}	$1.1256 \cdot 10^{-5}$	

Результат графического представления статической модели изменения мощности элемента Пельтье можно увидеть на рис. 5.

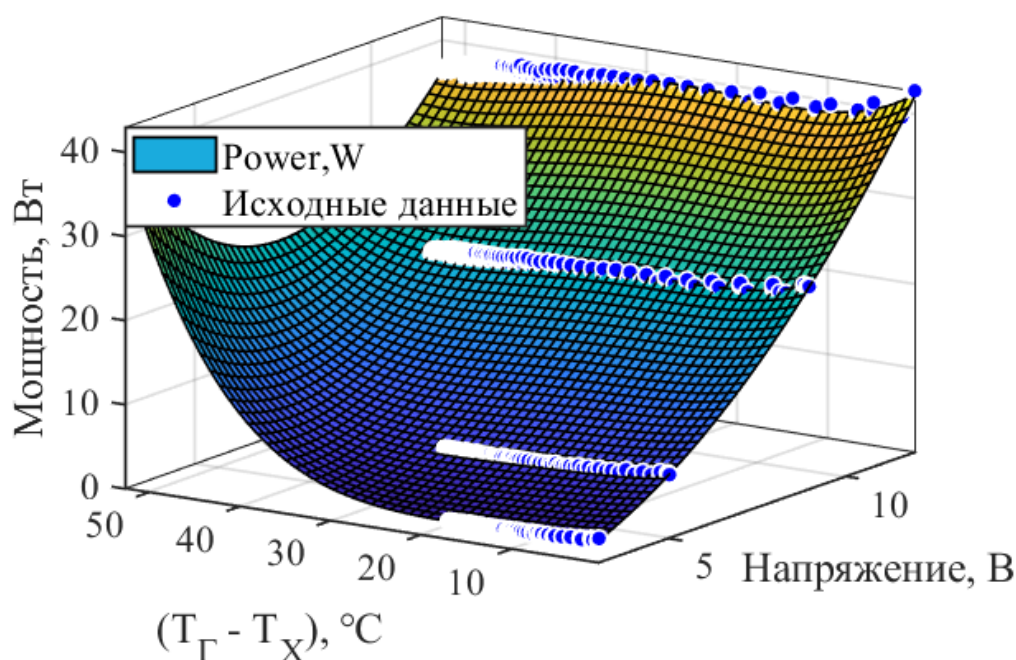


Рис. 5. Результат идентификации зависимости сопротивления от дельты температур на разных сторонах элемента Пельтье

Коэффициенты уравнения (2) и качество аппроксимации для описания внутреннего сопротивления элемента Пельтье представлены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (2) для мощности и показатели качества аппроксимации

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Качество
p_{00}	4.1764	p_{21}	-0.0026	SSE: 11.84 R^2 : 0.7641 Adjusted R^2 : 0.7631 RMSE: 0.0608
p_{10}	-0.4585	p_{12}	$7.8074 \cdot 10^{-4}$	
p_{01}	0.1033	p_{03}	$1.1678 \cdot 10^{-5}$	
p_{20}	0.0676	p_{31}	$1.9554 \cdot 10^{-4}$	
p_{11}	0.0014	p_{22}	$-7.5427 \cdot 10^{-5}$	
p_{02}	-0.0046	p_{13}	$1.2051 \cdot 10^{-5}$	
p_{30}	-0.0029	p_{04}	$-1.2903 \cdot 10^{-6}$	

Результат графического представления статической модели изменения внутреннего сопротивления элемента Пельтье можно увидеть на рис. 6.

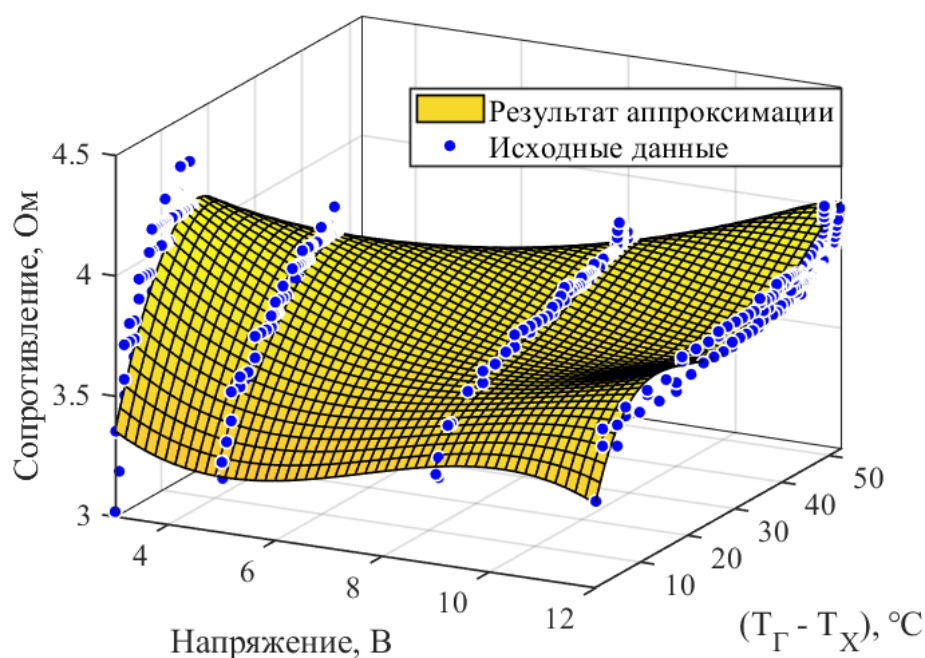


Рис. 6. Результат идентификации зависимости сопротивления от дельты температур на разных сторонах элемента Пельтье

После получения аналитической функции изменения сопротивления необходимо определить структуру математической модели стенда и сформировать систему ОДУ для нахождения недостающих параметров методом их оценки через переходные характеристики с применением МНК.

Воспользуемся методом накопителей и потоков для описания испытательного стенда через дифференциальные уравнения, где введем следующие обозначения: Θ_1 – представляет собой тепловую инерционность холодной пластины термоэлектрического модуля, Θ_2 – тепловую емкость горячей пластины элемента Пельтье, Θ_3 – аккумулирующую способность теплоотводящего радиатора. Тепловые потоки определяются следующим образом: q_1 характеризует теплообмен между холодной поверхностью Пельтье и окружающей средой; q_2 описывает теплопередачу внутри преобразователя от холодного к горячему спаю; q_3 соответствует тепловыделению, обусловленному омическим сопротивлением проводников (Джоулево тепло); q_4 отражает тепловой эффект, возникающий при протекании электрического тока через контакт двух разнородных проводников (эффект Пельтье); q_5 определяет интенсивность теплоотвода от нагретой поверхности элемента к охладителю; q_6 характеризует рассеивание тепловой энергии от радиатора в атмосферу. Структура модели представлена на рис. 7.

Тепловой поток между окружающей средой и холодной стороной элемента Пельтье описывается следующим выражением:

$$q_1 = S_{pel} (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{air} - \theta_1), \quad (3)$$

где v_{air} – скорость воздуха в области холодной стороны термоэлектрического преобразователя, м/с; a_0 и a_1 – табличные константы теплоотдачи с учетом движения воздушных масс, Вт/(м²·К); θ_{out} – температура окружающей среды, К; θ_1 – температура холодной стороны элемента Пельтье, К.

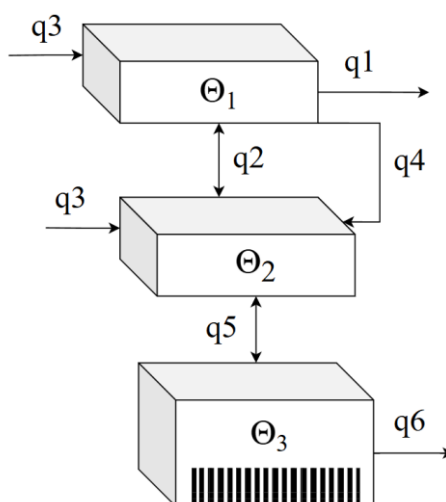


Рис. 7. Структура математической модели

Тепловой поток между холодной стороной термоэлектрического преобразователя и его горячей стороной представлен следующим выражением:

$$q_2 = S_{pn} \left(\frac{A_{pn}}{d_{pn}} \right) (\theta_2 - \theta_1), \quad (4)$$

где A_{pn} – это совокупная теплопроводность припоя, полупроводника и воздушной массы элемента Пельтье между керамическими пластинами, Вт/(м·К); d_{pn} – толщина припоя и полупроводниковых элементов в термоэлектрическом преобразователе, м; θ_2 – температура горячей стороны элемента Пельтье, К.

Джоулев нагрев описывается следующим уравнением:

$$q_3 = 0,5 \cdot I^2 R, \quad (5)$$

где I – сила тока, А; R – сопротивление элемента Пельтье, Ом.

Перенос тепла на основе эффекта Пельтье описывается уравнением:

$$q_4 = \alpha_p \cdot t \cdot I, \quad (6)$$

где α_p – коэффициент Зеебека (в результирующей модели коэффициенты будут рассчитываться для каждой стороны отдельно); t – абсолютная температура полупроводниковых элементов (для упрощения принимаем за температуру стороны элемента Пельтье, которую рассматриваем в основном уравнении модели), К.

Тепловой поток от горячей стороны элемента Пельтье к радиатору охлаждения:

$$q_5 = S_p \cdot \frac{A_t}{d_t} \cdot (\theta_3 - \theta_2), \quad (7)$$

где S_p – площадь внешней поверхности керамической пластины элемента Пельтье, м²; A_t – теплопроводность термопасты/прокладки, Вт/(м·К); d_t – толщина термопасты/прокладки, м; θ_3 – температура радиатора охлаждения, К.

Тепловой поток от радиатора на горячей стороне элемента Пельтье в окружающую среду:

$$q_6 = S_r (a_0 + v_{airfan}) (\theta_{air} - \theta_3), \quad (8)$$

где v_{airfan} – скорость ветра от системы активного охлаждения, м/с.

Основными накопителями представленного стенда являются две керамические пластины и радиатор охлаждения.

Для керамических пластин накопители описываются следующими уравнениями [24, 25]:

$$\begin{aligned} dQ_1 &= c_{Zr} p_{Zr} V_{Zr} \cdot d\theta_1 \\ dQ_2 &= c_{Zr} p_{Zr} V_{Zr} \cdot d\theta_2, \end{aligned} \quad (9)$$

где c_{Zr} – удельная теплоемкость керамической пластины, Дж/(кг·К); ρ_{Zr} – ее плотность, кг/м³; V_{Zr} – объем керамической пластины, м³; Q_1 и Q_2 – соответственно, количество теплоты в пластинах холодной и горячей стороны термоэлектрического преобразователя, Дж.

Для радиатора охлаждения:

$$dQ_3 = c_r p_r v_r \cdot d\theta_3. \quad (10)$$

Из уравнений (3-10) методом накопителей и потоков можно составить математическую модель, описывающую термодинамический процесс работы элемента Пельтье:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= \frac{1}{c_a p_a V_a} \left(S_{pel} (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{air} - \theta_1) + \right. \\ &\quad \left. + S_{pn} \left(\frac{A_{pn}}{d_{pn}} \right) (\theta_2 - \theta_1) - \alpha_p \cdot \theta_1 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R \right), \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{1}{c_a p_a V_a} \left(S_{pn} \left(\frac{A_{pn}}{d_{pn}} \right) (\theta_1 - \theta_2) + \alpha_p \cdot \theta_2 \cdot I + \right. \\ &\quad \left. + 0,5 \cdot I^2 R + S_p \frac{A_t}{d_t} (\theta_3 - \theta_2) \right), \\ \frac{d\theta_3}{dt} &= \frac{1}{c_r p_r V_r} \left(S_p \frac{A_t}{d_t} (\theta_2 - \theta_3) + S_r (a_0 + a_1 v_{airfan}) (\theta_{air} - \theta_3) \right). \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Для получения недостающих параметров необходимо провести их оценку, как задачу оптимизации, где решением данной проблемы будет набор значений параметров, удовлетворяющих заданным параметрам их варьирования и минимизирующих расхождение переходных характеристик в результате математического моделирования и данных по результатам экспериментов.

Для ускорения решения данной задачи воспользуемся программным пакетом Simulink с расширением «Parameter Estimator». Данный пакет позволяет выбрать выходные переменные, начальные условия для каждого дифференциального уравнения системы (11) и определить вектор параметров, которые необходимо оценить.

Таким образом, задача сводится к следующему математическому представлению:

$$\min_x \|F(x)\|_2^2 = \min_x [f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2],$$

при условии, что $\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$, где $F(x)$ – это вектор функций ошибок (остатков), x – вектор оцениваемых параметров, $f_i(x)$ – индивидуальные функции ошибок для каждого измерения. \underline{x} – вектор нижних границ для параметров, \bar{x} – вектор верхних границ для параметров. При этом:

$$f_n(x) = y_{ref}(t_n) - y_{sim}(t_n, x),$$

где y_{ref} – значение, измеренное в реальном эксперименте в момент времени t_n , y_{sim} – смоделированное значение в момент времени t_n .

Результаты. Оценка параметров позволила определить статические модели для основных параметров элемента Пельтье. Также с помощью данного метода был подтвержден материал керамических пластин, исходя из оптимизации времени процессов в моделируемых переходных характеристиках рассматриваемого образца ТЕС1-12706 путем анализа оптимальной удельной теплоемкости и плотности материала – это Al_2O_3 .

Таким образом, коэффициент теплопроводности при разном питающем напряжении элемента Пельтье описывается следующим законом (рис. 8):

$$f(x) = 0.00697 \cdot x^2 - 0.073 \cdot x + 1.11.$$

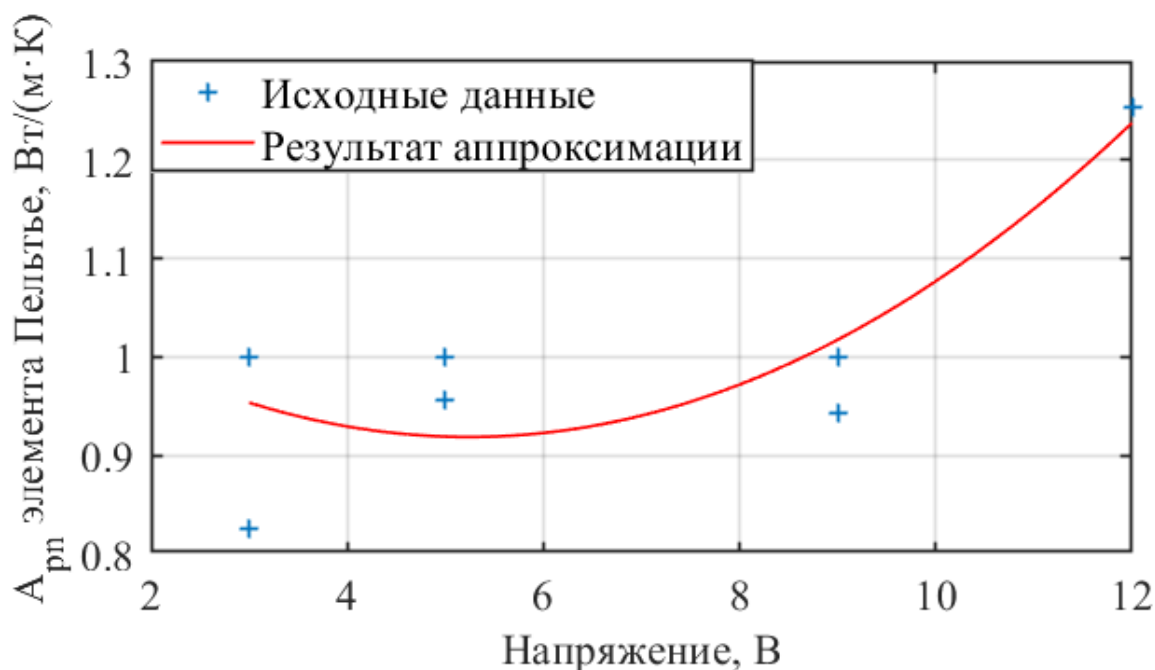


Рис. 8. Изменение коэффициента теплопроводности р-п переходов в элементе Пельтье ТЕС1-1270

Коэффициент Зеебека для холодной стороны при разном питающем напряжении элемента Пельтье описывается следующим законом (рис. 9):

$$f(x) = 0.00033 \cdot x^2 - 0.003135 \cdot x + 0.03878.$$

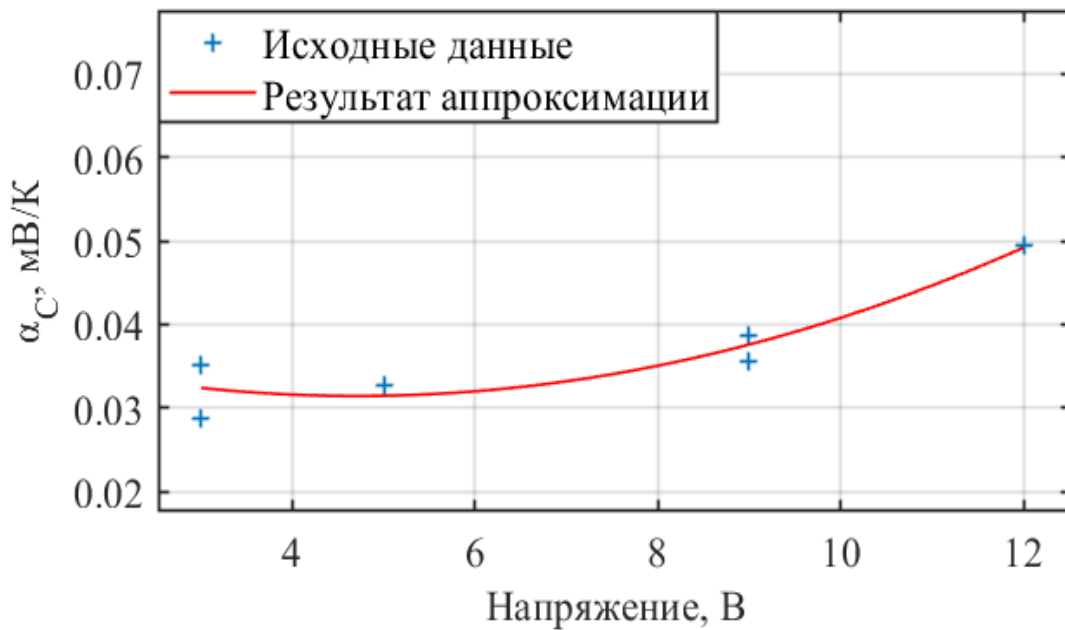


Рис. 9. Изменение коэффициента Зеебека по холодной стороне в элементе Пельтье TEC1-12706

Коэффициент Зеебека для горячей стороны при разном питающем напряжении элемента Пельтье описывается следующим законом (рис. 10):

$$f(x) = 0.00445 \cdot x + 0.05549.$$

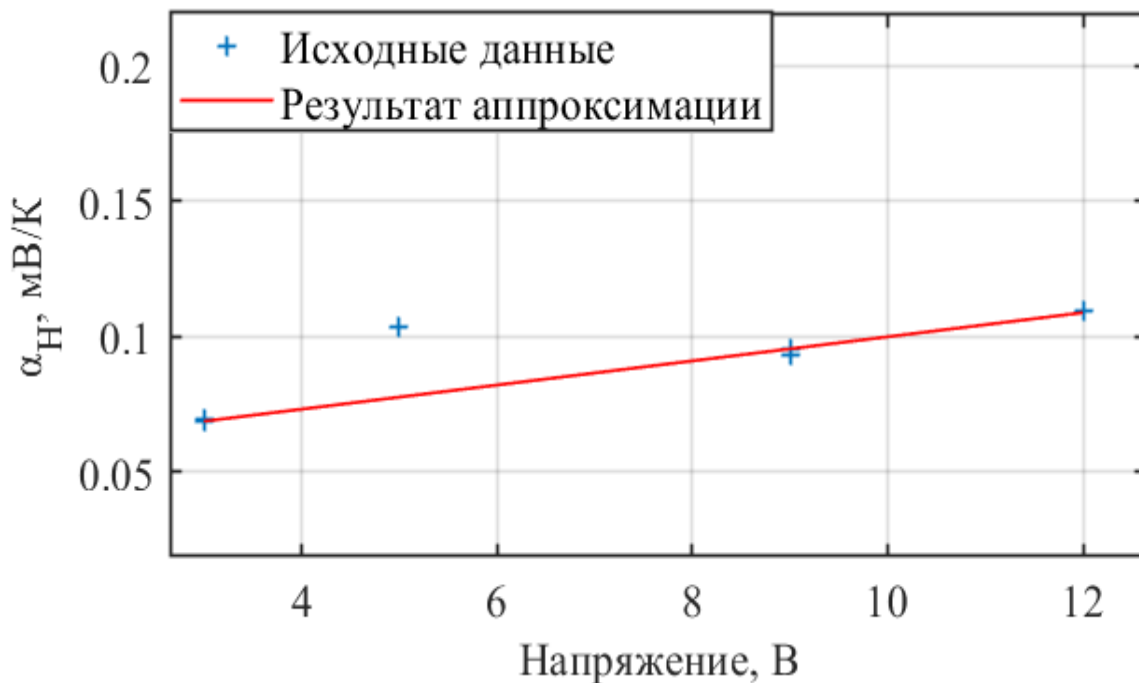


Рис. 10. Изменение коэффициента Зеебека по горячей стороне в элементе Пельтье TEC1-12706

Пример сравнения реальных переходных процессов с математическими моделями представлены на рис. 11 и рис. 12. Пунктиром приведены результаты реальных экспериментов, а непрерывной линией численный результат математической модели.

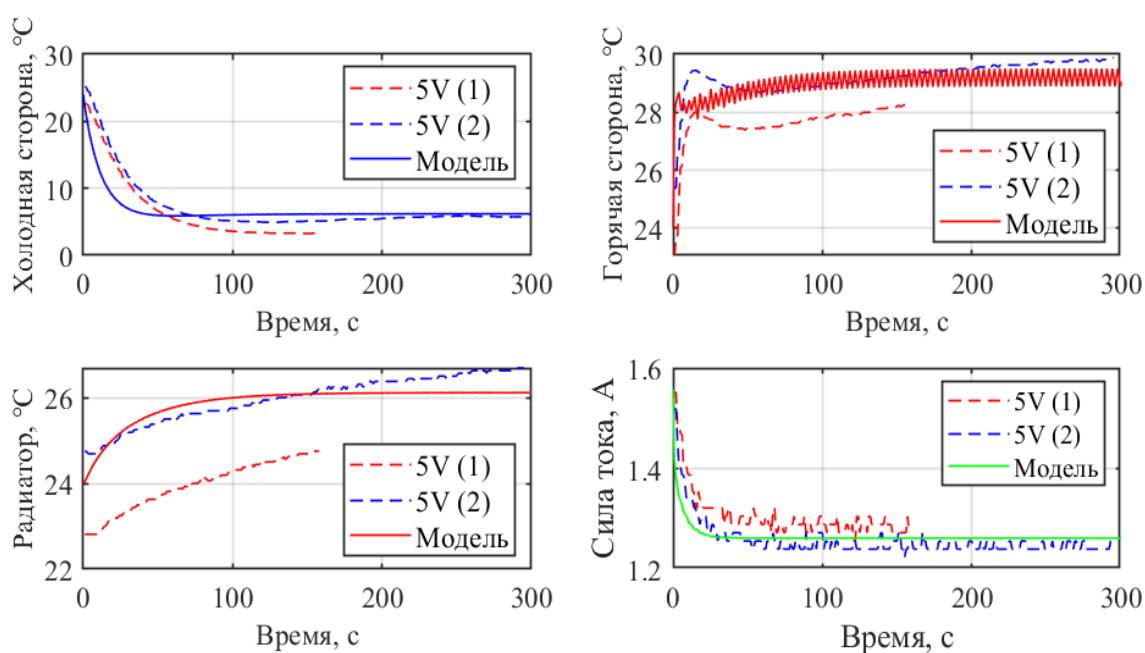


Рис. 11. Сравнение реальных переходных процессов и результата расчета математической модели с идентификацией параметров по методу нахождения внутреннего сопротивления элемента Пельтье при напряжении питания 5В (1 и 2 – номера реальных экспериментов)

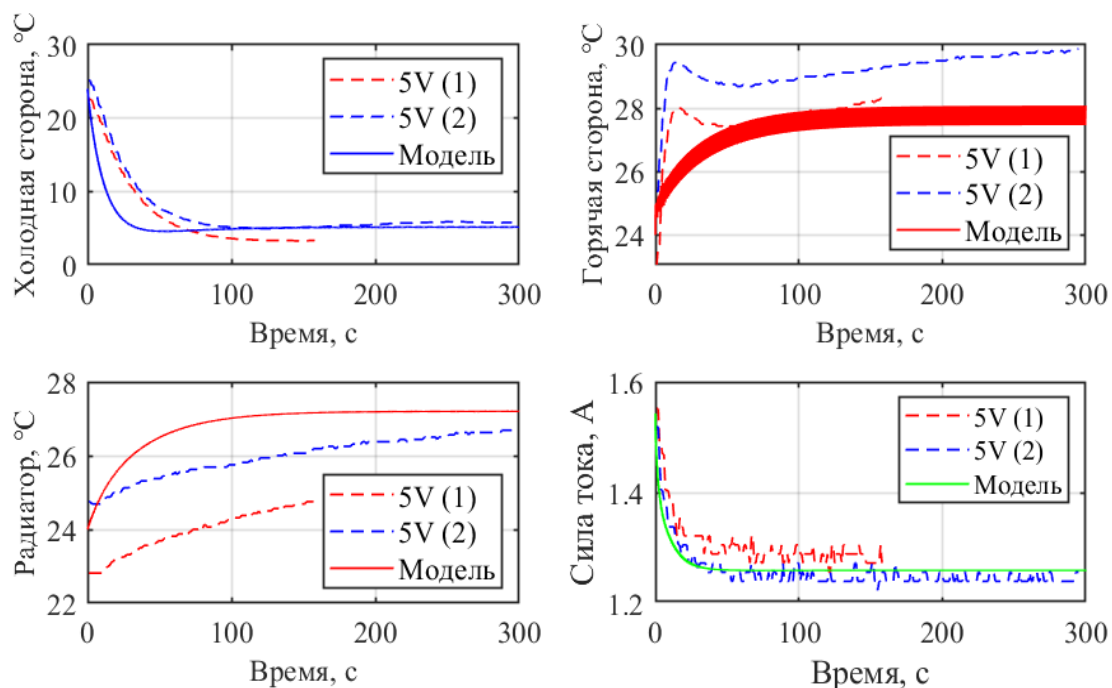


Рис. 12. Сравнение реальных переходных процессов и результата расчета математической модели с идентификацией параметров по методу нахождения мощности элемента Пельтье при напряжении питания 5В (1 и 2 – номера реальных экспериментов)

В таблице 3 представлены погрешности математических моделей, построенных разными подходами, от измеренных значений температур и тока в ходе экспериментов для различных напряжений в процентах.

Таблица 3. Сравнение отклонений математической модели по уравнению сопротивления (эксп. 1) и математической модели по мощности (эксп. 2)

Эксперимент:	1	2	1	2	1	2	1	2
Напряжение питания, В	3		5		9		12	
Холодная сторона элемента Пельтье	2,08 %	1,69 %	1,82 %	2,13 %	0,19 %	14,28 %	1,70 %	0,76 %
Горячая сторона элемента Пельтье	1,93 %	2,59 %	2,69 %	8,40 %	5,44 %	41,22 %	3,71 %	8,79 %
Радиатор	0,48 %	0,10 %	2,40 %	2,45 %	4,84 %	5,07 %	3,23 %	0,97 %
Сила тока	0,01 %	0,01 %	0,02 %	0,02 %	0,15 %	0,13 %	0,47 %	0,04 %
Среднее отклонение, %	1,13 %	1,10 %	1,73 %	3,25 %	2,65 %	15,17 %	2,28 %	2,64 %

Выводы. Таким образом, были рассмотрены два подхода к идентификации и моделированию переходных процессов элементах Пельтье. Первый основан на определении изменений внутреннего сопротивления, а второй основывается на уравнении мощностной характеристики. В ходе оценки отклонений математических моделей наибольшую результирующую точность показал подход с применением аналитического выражения внутреннего сопротивления рассматриваемого образца термоэлектрического преобразователя. Однако видно, что в некоторых условиях модель на основе мощностной характеристики дает более точные результаты. Поэтому верным решением в дальнейшем развитии данных моделей будет адаптация и применение сразу двух подходов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Performance Analysis of Multistage Thermoelectric Cooler with Water-Cooled / Y. Sun [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2442. – P. 012028. – DOI 10.1088/1742-6596/2442/1/012028.
2. Peltier Device: Electrothermal cooler or thermoelectric generator [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/peltierdevice.html> (дата обращения: 25.10.2025).
3. Performance analysis of a thermoelectric cooler with a corrugated architecture / O. Owoyele [et al.] // Applied Energy. – 2015. – Vol. 147. – DOI 10.1016/j.apenergy.2015.01.132.
4. Abdulghani, Z. R. A novel experimental case study on optimization of Peltier air cooler using Taguchi method / Z. R. Abdulghani // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 16. – P. 100627. – DOI 10.1016/j.rineng.2022.100627.
5. Giant Deformation Induced Staggered-Layer Structure Promoting the Thermoelectric and Mechanical Performance in n-Type Bi₂(Te, Se)₃ / F. Zhang [et al.] // Small. – 2024. – DOI 10.1002/sml.202401070.
6. Design and preparation of high-performance bulk thermoelectric materials / H. S. Lee [et al.] // Journal of the Korean Ceramic Society. – 2017. – Vol. 54, № 2. – P. 105-115. – DOI 10.4191/kcers.2017.54.2.10.
7. Interfacial reactions in thermoelectric modules / M. Zou [et al.] // Materials Research Letters. – 2018. – Vol. 6, № 3. – P. 143-150. – DOI 10.1080/21663831.2018.1436092.
8. Creep behavior and post-creep thermoelectric performance of the n-type Skutterudite alloy Yb_{0.3}Co₄Sb₁₂ / M. Malki [et al.] // Journal of Materiomics. – 2020. – Vol. 7. – DOI 10.1016/j.jmat.2020.07.012.
9. Half-Heusler thermoelectrics: Advances from materials fundamental to device engineering / W. Li [et al.] // Joule. – 2024. – Vol. 8, № 5. – P. 1274–1311. – DOI 10.1016/j.joule.2024.03.016.
10. Thermoelectric materials for space explorations / D. Palaporn [et al.] // Materials Advances. – 2024. – Vol. 5, № 13. – P. 5351-5364. – DOI 10.1039/D4MA00309H.
11. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications / N. Jaziri [et al.] // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 264–287. – DOI 10.1016/j.egy.2019.12.011.

12. Experimental study on the performance of Peltier TEC12706 as a cooling and heating media / S. Sujono [et al.] // *Jurnal Polimesin*. – 2024. – Vol. 22. – P. 600. – DOI 10.30811/jpl.v22i6.5345.
13. Precise characterization of Peltier heat at the heterointerface based on thermography / Z. Wu [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2025. – Vol. 126. – DOI 10.1063/5.0260465.
14. A Novel Approach to Determine the Type of Conductivity in Semiconductors Using a Combined Seebeck and Peltier Effects / N. Numan [et al.] // *International Journal of Innovative Research*. – 2025. – Vol. 12, № 1. – P. 54–64. – DOI 10.53523/ijoirVol12I1ID476.
15. Characterization of Commercial Thermoelectric Modules for Precision Heat Flux Measurement / J. Crossley [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2022. – Vol. 93, № 11. – DOI 10.48550/arXiv.2208.04265.
16. Analysis of Transient Modes of Peltier Thermoelectric Elements under Various Input Influences / G. S. Vasilyev [et al.] // *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. – 2024. – Vol. 18, № 1. – P. 199-204. – DOI 10.30486/mjee.2024.2000084.1304.
17. Alaoui, C. Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation / C. Alaoui // *International Journal of Engineering*. – 2011. – Vol. 5. – P. 114–121.
18. Безик, Д. А. Определение параметров тепловой модели элементов Пельтье / Д. А. Безик, Т. В. Бычкова // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2025. – № 2 (38). – С. 103-112. – DOI 10.25729/ESI.2025.38.2.009.
19. Саблин, М. А. Модули Пельтье SP1848 в режимах теплопереноса и генерации электрической энергии, и их практическое применение / М. А. Саблин, Г. В. Саблина, В. Г. Трубин // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. – 2024. – Т. 2, № 2. – С. 45-51. – DOI 10.18799/29495407/2024/2/52. – EDN VFGTCF.
20. Моделирование и идентификация элемента Пельтье TEC1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб / Ю. А. Иванов, А. Д. Лукьянов, Д. Ю. Донской, Д. В. Рудой // *Агроинженерия*. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 58-65. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-3-58-65. – EDN BZMDHL.
21. Донской, Д. Ю. Математическая модель малогабаритного биореактора для оценки влияния входных воздействий на его содержимое / Д. Ю. Донской // *Системы управления и информационные технологии*. – 2025. – № 3(101). – С. 54-59. – EDN IWRIXD.
22. Integration of Fresnel Lens Solar Concentration in a TEC1-12706 Thermoelectric Generator Prototype / A. Sofijan [et al.] // *ScienceRise*. – 2025. – Vol. 1. – P. 3–10. – DOI 10.21303/2313-8416.2025.003847.
23. Гринкевич, В. А. Идентификация устройства на основе элемента Пельтье методом наименьших квадратов / В. А. Гринкевич // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2020. – № 1–2 (46–47). – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.
24. Das, R. AI-Assisted Coding Project in Python: Thermoelectric Simulation of Peltier Device / R. Das. – 2025. – 16 p.
25. Numerical performance estimation of segmented thermoelectric elements / E. Muller [et al.] // *ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics*. – Clemson, SC, USA, 2005. – P. 364–369. – DOI 10.1109/ICT.2005.1519959.

REFERENCES LIST

1. Performance Analysis of Multistage Thermoelectric Cooler with Water-Cooled / Y. Sun [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2442. – P. 012028. – DOI 10.1088/1742-6596/2442/1/012028.
2. Peltier Device: Electrothermal cooler or thermoelectric generator [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/peltierdevice.html> (дата обращения: 25.10.2025).
3. Performance analysis of a thermoelectric cooler with a corrugated architecture / O. Owoyele [et al.] // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 147. – DOI 10.1016/j.apenergy.2015.01.132.
4. Abdulghani, Z. R. A novel experimental case study on optimization of Peltier air cooler using Taguchi method / Z. R. Abdulghani // *Results in Engineering*. – 2022. – Vol. 16. – P. 100627. – DOI 10.1016/j.rineng.2022.100627.
5. Giant Deformation Induced Staggered-Layer Structure Promoting the Thermoelectric and Mechanical Performance in n-Type Bi₂(Te, Se)₃ / F. Zhang [et al.] // *Small*. – 2024. – DOI 10.1002/smll.202401070.
6. Design and preparation of high-performance bulk thermoelectric materials / H. S. Lee [et al.] // *Journal of the Korean Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 54, № 2. – P. 105-115. – DOI 10.4191/kcers.2017.54.2.10.
7. Interfacial reactions in thermoelectric modules / M. Zou [et al.] // *Materials Research Letters*. – 2018. – Vol. 6, № 3. – P. 143-150. – DOI 10.1080/21663831.2018.1436092.
8. Creep behavior and post-creep thermoelectric performance of the n-type Skutterudite alloy Yb_{0.3}Co₄Sb₁₂ / M. Malki [et al.] // *Journal of Materiomics*. – 2020. – Vol. 7. – DOI 10.1016/j.jmat.2020.07.012.

9. Half-Heusler thermoelectrics: Advances from materials fundamental to device engineering / W. Li [et al.] // Joule. – 2024. – Vol. 8, № 5. – P. 1274–1311. – DOI 10.1016/j.joule.2024.03.016.
10. Thermoelectric materials for space explorations / D. Palaporn [et al.] // Materials Advances. – 2024. – Vol. 5, № 13. – P. 5351–5364. – DOI 10.1039/D4MA00309H.
11. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications / N. Jaziri [et al.] // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 264–287. – DOI 10.1016/j.egy.2019.12.011.
12. Experimental study on the performance of Peltier TEC12706 as a cooling and heating media / S. Sujono [et al.] // Jurnal Polimesin. – 2024. – Vol. 22. – P. 600. – DOI 10.30811/jpl.v22i6.5345.
13. Precise characterization of Peltier heat at the heterointerface based on thermography / Z. Wu [et al.] // Applied Physics Letters. – 2025. – Vol. 126. – DOI 10.1063/5.0260465.
14. A Novel Approach to Determine the Type of Conductivity in Semiconductors Using a Combined Seebeck and Peltier Effects / N. Numan [et al.] // International Journal of Innovative Research. – 2025. – Vol. 12, № 1. – P. 54–64. – DOI 10.53523/ijoirVol12I1ID476.
15. Characterization of Commercial Thermoelectric Modules for Precision Heat Flux Measurement / J. Crossley [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2022. – Vol. 93, № 11. – DOI 10.48550/arXiv.2208.04265.
16. Analysis of Transient Modes of Peltier Thermoelectric Elements under Various Input Influences / G. S. Vasilyev [et al.] // Majlesi Journal of Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 18, № 1. – P. 199–204. – DOI 10.30486/mjee.2024.2000084.1304.
17. Alaoui, C. Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation / C. Alaoui // International Journal of Engineering. – 2011. – Vol. 5. – P. 114–121.
18. Bezik, D. A. Opredelenie parametrov teplovoi modeli elementov Pelte / D. A. Bezik, T. V. Bychkova // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii, 2025. – № 2 (38). – S. 103–112. – DOI 10.25729/ESI.2025.38.2.009.
19. Sablin, M. A. Moduli Pelte SP1848 v rezhimakh teploperenosa i generatsii elektricheskoi energii, i ikh prakticheskoe primenenie / M. A. Sablin, G. V. Sablina, V. G. Trubin // Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Promyshlennaia kibernetika. – 2024. – T. 2, № 2. – S. 45–51. – DOI 10.18799/29495407/2024/2/52. – EDN VFGTGF.
20. Modelirovanie i identifikatsiia elementa Pelte TEC1-12706 dlia primeneniia v maloobieemnykh bioreaktorakh iskusstvennogo ZhKT ryb / Iu. A. Ivanov, A. D. Lukianov, D. Iu. Donskoi, D. V. Rudoi // Agroi zheneriia. – 2024. – T. 26, № 3. – S. 58–65. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-3-58-65. – EDN BZMDHL.
21. Donskoi, D. Iu. Matematicheskaiia model malogabaritnogo bioreaktora dlia otsenki vliianiia vkhodnykh vozdeistvii na ego sodержimoe / D. Iu. Donskoi // Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. – 2025. – № 3(101). – S. 54–59. – EDN IWRIXD.
22. Integration of Fresnel Lens Solar Concentration in a TEC1-12706 Thermoelectric Generator Prototype / A. Sofijan [et al.] // ScienceRise. – 2025. – Vol. 1. – P. 3–10. – DOI 10.21303/2313-8416.2025.003847.
23. Grinkevich, V. A. Identifikatsiia ustroistva na osnove elementa Pelte metodom naimenshikh kvadratov / V. A. Grinkevich // Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii. – 2020. – № 1–2 (46–47). – S. 17–27. – DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.
24. Das, R. AI-Assisted Coding Project in Python: Thermoelectric Simulation of Peltier Device / R. Das. – 2025. – 16 p.
25. Numerical performance estimation of segmented thermoelectric elements / E. Muller [et al.] // ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics. – Clemson, SC, USA, 2005. – P. 364–369. – DOI 10.1109/ICT.2005.1519959.

Поступила в редакцию 17.11.2025 г., рекомендована к изданию 15.01.2026 г.

DETERMINATION AND COMPARISON OF IDENTIFICATION AND MODELING METHODS FOR A PELTIER ELEMENT BASED ON ITS TRANSIENT CHARACTERISTICS

Lukianov A.D., Donskoi D.IU.

This paper presents methods for identifying and modeling thermoelectric converters based on the Peltier effect. The methods consist of algorithms for mathematically evaluating the results of a number of physical experiments on a thermoelectric converter under various control conditions and known stationary environmental conditions. The application of the described techniques makes it possible to determine the physical parameters necessary for modeling and unique for each Peltier element. In the course of the work, the parameters of the TEC1-12706 Peltier element, which is popular on the market, were identified and the accuracy of mathematical modeling results based on the proposed approaches was analyzed.

Keywords: Peltier element, approximation, LSM, parametric optimization.

Лукьянов Александр Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону.
E-mail: alexlukjanov1998@gmail.com

Lukianov Aleksandr Dmitrievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes of Don State Technical University, Russian Federation, Rostov-on-Don.
ORCID: 0000-0002-3827-6569

Донской Данила Юрьевич

старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону.
E-mail: dand22@bk.ru

Donskoi Danila IUrevich

Senior Lecturer at Department of Automation of Production Processes of Don State Technical University, Russian Federation, Rostov-on-Don.
ORCID: 0000-0002-3556-7758

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В ТЕТРАЛОГИЧЕСКОМ БАЗИСЕ

© 2026 Койбаш А.А., Завадская Т.В., Мальцева Р.В.

Представлена модель адаптивного представления стохастических сенсорных данных с использованием принципов постбинарного кодирования. Разработан механизм выбора тетралогического формата в зависимости от флуктуаций сигнала, основанный на введении порогового значения для квантования мантиссы. Реализовано атомарное сохранение математического ожидания результатов измерений совместно с их шумовой составляющей. На цифровом двойнике терморезистора экспериментально подтверждена корректность работы модели и эффективность предложенного подхода как в стационарных, так и в высокочастотных условиях.

Ключевые слова: сенсорные данные, измерение, постбинарный компьютеринг, тетралогика, интервальные данные.

Введение. Информационно-компьютерные технологии развиваются уже многие десятилетия, и темпы этого развития непрерывно возрастают. Интернет вещей становится неотъемлемой частью повседневности [1], умные города позволяют улучшать различные аспекты человеческой жизни [2], а концепция киберфизических систем всё больше воплощается в окружающую действительность [3]. Таким образом, уже сейчас можно говорить о полноценной глобальной информационно-компьютерной инфраструктуре в контексте большой взаимной связанности вычислительных устройств.

Для получения информации реального мира таким устройствам нужны «глаза и уши» – большое количество разнородных датчиков, интегрированных в общую инфраструктуру. В связи с этим последние десятилетия характеризуются тенденциями к проектированию сенсорных систем [4], представляющих собой объединение датчиков на основе вычислительного узла (например, микроконтроллера). Это даёт компьютерам возможность своевременно получать актуальные данные о различных параметрах окружающей среды, что в свою очередь позволяет принимать дальнейшие решения на основе автоматизированных средств анализа, управления и обработки информации, а также методах статистики.

Точность датчиков и качество измерительных данных оказывают непосредственное влияние на принимаемые автоматизированными системами решения. В сфере разработки сенсорных систем есть тенденции к улучшению шумовых характеристик, как это показано в работе [5] на примере микроэлектромеханических датчиков. Тем не менее, текущий технологический потенциал практически исчерпан, и рост точности замедляется. При этом наблюдается технологическое деление на большие прецизионные датчики для специализированного использования и маленькие «шумные» для встраиваемых систем массового сегмента. Сама же величина погрешности в момент измерений может стать индикатором некорректной работы датчика (например, высокий шум питания в результате неправильного монтажа или внешние помехи полей). В долгосрочной же перспективе статистика данных о шуме

может указывать на деградацию датчика со временем, благодаря чему можно провести своевременное техническое обслуживание или замену сенсорного устройства. Следовательно, такая информация является полезной и её необходимо учитывать в ходе измерений.

Шум приводит к тому, что полученные с датчика данные варьируются в определённых пределах и соответствуют закону нормального распределения [6]. Это даёт возможность представлять результат измерения в виде интервала. Однако форматы представления вещественного числа с плавающей запятой стандарта IEEE 754 [7] и интервала стандарта IEEE 1788 [8] направлены на хранение точных значений и не содержат эффективных механизмов структурированного представления метрологической достоверности измерений.

Преодолеть данный недостаток можно путём использования многозначных логик. Эта цель достигается в постбинарном компьютеринге – концепции, расширяющей двоичный базис до четырёх состояний. Данные идеи получили развитие в работах [9, 10], предлагая дополнить классический дуализм состояний 1-«истина» и 0-«ложь» новыми состояниями М-«множественность» (и истина, и ложь) и А-«неопределённость» (ни истина, ни ложь). Получившаяся логика четырёх состояний сформулирована как тетралогика, а единицей представления информации в ней стал тетрит (взамен биту двоичной логики).

Постбинарный компьютеринг предлагает альтернативы стандартам IEEE 754 и IEEE 1788. Формат P64/32r позволяет хранить вещественное число одинарной точности в виде тетракода и может быть представлен в режиме совместимости с двоичной логикой: $\langle A \rangle_4 = 00_2$, $0_4 = 01_2$, $1_4 = 10_2$, $M_4 = 11_2$. Его структура отображена на рисунке 1 [10].

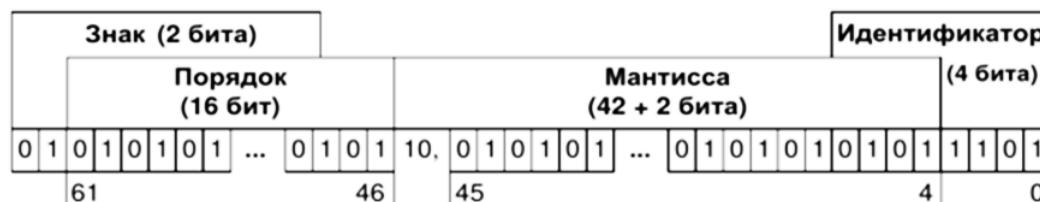


Рис. 1. Структура постбинарного формата P64/32r [10]

P64/32r способен кодировать интервал вещественных чисел, поскольку его структура сходна со стандартным форматом с плавающей запятой. В кратком изложении данная процедура выглядит следующим образом:

– совпадение разрядов приводит к сохранению текущего логического состояния: бит 0 станет тетритом 0, а бит 1 – тетритом 1;

– несовпадение в разрядах вызывает переход состояний: если старшая граница интервала больше, то данный разряд кодируется тетритом М, если меньше – тетритом А.

Декодирование в двоичное число возможно как в минимальном варианте, так и в максимальном расширении для гарантированного охвата исходного интервала. В минимальном интервале используются следующие переходы состояний:

– в младшей границе М переходит в 0, А переходит в 1;

– в старшей границе М переходит в 1, А переходит в 0.

Для максимального интервала:

– в младшей границе и М, и А переходят в 0;

– в старшей границе и М, и А переходят в 1.

Следует отметить, что использование данного формата накладывает определённые ограничения: обе границы интервала должны иметь одинаковый знак и порядок числа. То есть, находиться в одной бинаде – интервале между соседними степенями двойки. Это допустимо в стационарных условиях и случаях, когда флуктуация сигнала не пересекает границу между бинадами. В условиях же высокой динамики сигнала и расположении границ интервала в разных сторонах от нуля или степени двойки восстановленные значения теряют достоверность. Это приводит к чрезмерному расширению неопределённости и «пузырях» на графиках, что показано в симуляции [11] и программно-аппаратной реализации сенсорной системы [12]. В таких случаях целесообразно использовать формат Pб128/32ip, предназначенный для хранения двух вещественных чисел одинарной точности в виде тетракода. Его структура изображена на рисунке 2.



Рис. 2. Структура постбинарного формата Pб128/32ip [10]

Данный подход позволяет хранить обе границы интервала отдельно друг от друга с высокой точностью, тем не менее сохраняя неделимость (атомарность) в представлении информации.

Проведенный анализ показывает, что постбинарный компьютеринг обладает всем необходимым инструментарием для кодирования сигнала в различных режимах работы датчика. Следовательно, на его базе представляется возможным создать модель, которая позволит описать состояние измерительного канала в дискретный момент времени с учетом стохастической составляющей и сможет показать адекватность в различных условиях.

Разработка модели. Модель основывается на интервальном представлении результатов измерений как совокупности случайных флуктуаций. Пусть $X(t)$ – наблюдаемый физический процесс. В дискретный интервал времени t_i сенсорная система формирует выборку измерений датчика V_i размером N элементов. Каждый результат x_k выборки находится в области действительных чисел с дополнительным условием в виде возможности представления числа в формате с плавающей запятой одинарной точности стандарта IEEE 754. Второе ограничение связано, в том числе, и с измерительными возможностями большинства датчиков, которые ещё не достигли той степени точности и диапазона измерений, при которой возникает необходимость в числах двойной точности и более.

Правило формирования выборки можно сформулировать следующим образом:

$$V_i = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \subset R, \forall x_k \in V_i: |x_k| \leq 3,4 \cdot 10^{38},$$

где V_i – текущая выборка измерений; N – размер выборки; x_k – результат измерений в рамках текущей выборки.

Поскольку в измерительном процессе флуктуации в стационарном режиме подчиняются закону нормального распределения, на основе выборки можно создать симметричный относительно математического ожидания интервал I_i :

$$I_i = [x_L; x_R],$$

где x_L – левая граница интервала; x_R – правая граница интервала.

Такой подход не противоречит и режиму высокой динамики измерений. Интервал может стать достаточно широким, однако это только подтверждает процесс стремительного преобразования численной величины измеряемой характеристики, а рост/спад значения математического ожидания является индикатором скорости изменений в текущий момент времени.

Модель использует принципы постбинарного компьютеринга, интерпретируя состояния четырёхзначной логики применительно к сигналу следующим образом:

- состояния 0-«ложь» и 1-«истина» соответствуют определённости (детерминированности) в значении сигнала;
- состояние M-«множественность» задаёт симметричное расхождение сигнала в обе стороны относительно математического ожидания;
- состояние A-«неопределённость» определяет вероятную турбулентность внутри границ.

Интервал в стационарном режиме измерений в большинстве случаев можно закодировать постбинарным форматом числа с плавающей запятой P_{b64/32p}. Исключением являются измерения, при которых флуктуации пересекают ноль или границы степеней двойки, что приводит к нахождению границ интервала в разных бинадах. Это же характерно для большинства измерений в условиях высокой динамики, поэтому необходим адаптивный подход к представлению информации в разных форматах тетракода:

- T_{Pb64/32p} – тетралогическое число размером 32 тетрита, используемое преимущественно для стационарных измерений;
- T_{Pb128/32ip} – тетралогическое число размером 64 тетрита, применяемое при значительных флуктуациях сигнала или расположении интервала в разных бинадах.

Для определения формата вводится набор операторов для декомпозиции числа на структурные компоненты в соответствии со стандартом IEEE 754:

- $S(x)$: выделение знакового бита числа (*sign*);
- $E(x)$: выделение битов порядка числа (*exponent*);
- $M(x)$: выделение битов мантиссы числа (*mantissa*).

Тогда информационную модель, определяющую формат представления данных, можно выразить системой:

$$P_i = \begin{cases} T_{Pb64/32p}, & \text{если } (S(x_L) = S(x_R)) \wedge (E(x_L) = E(x_R)) \\ T_{Pb128/32ip}, & \text{иначе} \end{cases} . \quad (1)$$

Представление результатов измерений с точностью в полную длину мантиссы зачастую является избыточным и даже может ввести в заблуждение. Так, для терморезистора со стандартным отклонением $\sigma > 0,2$ °C сохранять значение температуры до 0,001 °C (что позволяет стандартный 12-разрядный аналогово-цифровой преобразователь) не является целесообразным. Поэтому для кодирования мантиссы в тетракод вводится дополнительный параметр $K \in [2; 22]$ – пороговое значение, определяющее минимальный шаг квантования измеряемой величины.

Разряды мантиссы, меньшие K , являются незначащими, при постбинарном кодировании они заполняются значением A -«неопределённость», что логически соответствует как уровню разрешающей способности датчика, так и флуктуациям сигнала из-за самого физического процесса. Разряды, большие K , являются значимыми и кодируются по стандартным правилам преобразования постбинарного компьютеринга.

Следовательно, можно вычислить минимальный шаг квантования Δ :

$$\Delta(E, K) = 2^{(E-22+K)}, \quad (2)$$

где E – порядок вещественного числа; K – параметр модели.

Это означает, что границы интервала и точечная оценка результата измерений (математическое ожидание) могут быть восстановлены с дискретностью Δ .

Например, если температура находится в бинаде $[2\text{ °C}; 4\text{ °C}]$ (порядок $E = 1$) и параметр модели задан значением $K = 20$, то согласно (2) шаг квантования составляет $\Delta(E, K) = 2^{1-22+20} = 2^{-1} = 0,5\text{ °C}$. Если точность до $0,5\text{ °C}$ достаточна, то параметр выбран корректно. Если же датчик температуры прецизионный и необходимо сохранять значения до $0,01\text{ °C}$, то параметр K необходимо снизить хотя бы до 14.

Из этого также следует, что в случае различных порядков $E_L \neq E_R$ каждая граница x_L и x_R будет иметь свою точность представления. Поэтому рекомендуется при подборе параметра K учитывать больший порядок числа.

При этом возможны ситуации, когда при разных порядках границ интервала может возникнуть большое относительное смещение. Тогда при больших значениях K значащая часть мантиссы будет заполнена состояниями A -«неопределённость» и декодирование уменьшит интервал до нулевой ширины. В связи с этим необходимо гарантировать минимальную глубину точности мантиссы на величину разницы между порядками через условие: $K < 22 - |E(x_R) - E(x_L)|$. Тогда правило кодирования можно выразить системой:

$$T[j] = \begin{cases} \text{Код}(x_L[j], x_R[j]), & \text{если } j \geq K \\ A, & \text{если } j < K \end{cases}, \text{ при } K < 22 - |E(x_R) - E(x_L)|. \quad (3)$$

где K – пороговое значение, определяющее минимальный значимый разряд.

Кодирование и декодирование интервала. Знак и порядок вещественного числа во всех случаях будет представлен детерминированными состояниями 0 и 1.

При совпадении знака и порядка единое значение переносится в разряды [31..23] числа формата Pб64/32р. Затем производится кодирование мантиссы в разрядах [22..2] в набор состояний $\{0, 1, M, A\}$ по правилам системы (3). Разряды [1..0] представляют идентификатор формата и определены значением MO .

При несовпадении знака и/или порядка используется формат Pб128/32ip, тогда:

- разряды [31..23] числа x_L будут перенесены в тетриты T_{Pб128/32ip}[63..55];
- разряды [31..23] числа x_R будут перенесены в тетриты T_{Pб128/32ip}[33..25].

Далее мантисса в разрядах [22..2] обеих границ x_L и x_R преобразуются в тетракод аналогично формату Pб64/32р по правилам системы (3), после чего записываются в соответствующие разряды для левой границы T_{Pб128/32ip}[54..34] и правой границы T_{Pб128/32ip}[24..4]. Младшие разряды представляют идентификатор формата и принимают значение $A11M$.

Процедура обратного преобразования постбинарного числа P_i в интервал I_i начинается с определения идентификатора формата: MO соответствует формату Pб64/32р, $A11M$ – формату Pб128/32ip. Дальнейшее декодирование происходит в виде

минимальных и максимальных границ согласно правилам постбинарного компьютеринга [10]. В дополнение к этому, декодирования из формата Pb128/32ip имеет свои ограничения:

- разряды для левой и правой границы интервала выбираются исходя из соответствующих областей тетракода, что показано ранее на рисунке 2;
- последние два разряда границ принимают значения $x_{Lmin}[1..0] = 11$, $x_{Rmin}[1..0] = 00$; $x_{Lmax}[1..0] = 00$, $x_{Rmax}[1..0] = 11$;
- при разных знаках или порядках чисел гарантированное восстановление может быть только по минимальным границам.

Поскольку модель принимает симметричный относительно математического ожидания интервал, точечной оценкой измеряемой величины с шагом квантования Δ является центр любого из восстановленных интервалов $[x'_L; x'_R]$ (для Pb64/32p) или минимального интервала (для Pb128/32ip). Тогда результат измерения равен:

$$x_M = \frac{x'_L + x'_R}{2}. \quad (4)$$

Экспериментальная проверка модели. Для проверки модели целесообразно использовать цифровой двойник терморезистора, который сможет генерировать значения температуры с отклонением, соответствующим реальному датчику. В работе [6] выполнено 144 измерения (9 серий при разных температурах по 16 измерений), что обеспечивает достаточную точность оценки среднеквадратичного отклонения. Для каждой серии посчитано стандартное отклонение выборки:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

где $n = 16$ – количество измерений в серии; x_i – значения в наборе данных.

Данные расчётов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Стандартные отклонения для серий измерений терморезистора

№ серии (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s, °C	0,27	0,13	0,25	0,26	0,17	0,22	0,21	0,2	0,3

На основании отдельных отклонений рассчитано объединённое отклонение:

$$s_{\text{объединенное}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (n_j - 1) s_j^2}{\sum_{j=1}^k (n_j - 1)}},$$

где $k = 9$ – число серий измерений; $n_j = 16$ – количество измерений в серии; s_j – стандартное отклонение j-й серии.

Далее можно вычислить стандартное отклонение терморезистора:

$$s_{\text{объединенное}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (n_j - 1) s_j^2}{\sum_{j=1}^k (n_j - 1)}} = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_9^2}{9}} = 0,23.$$

Значение в 0,23 °C может быть принято в качестве шумовой характеристики терморезистора и использоваться для дальнейших расчётов.

Для проверки модели в стационарных условиях, близких к реальным, использован симулятор терморезистора с рассчитанным стандартным отклонением. В качестве размера выборки взято значение $N = 16$, аналогичное эксперименту работы [6]. За короткий интервал времени получена серия измерений и сформирован симметричный интервал $[29,46\text{ }^\circ\text{C}; 30,2\text{ }^\circ\text{C}]$ в единой бинаде согласно (1). Среднее значение соответствует точечной оценке результата измерений и составляет $29,83\text{ }^\circ\text{C}$. Порог $K=12$ подобран эмпирическим путём для соответствия шага дискретизации требуемой точности. Результат кодирования интервала в тетракод $T_{Pb64/32p}$ и обратного декодирования в пары двоичных вещественных чисел сведён в таблицу 2.

Тетракод формата $T_{Pb64/32p}$ описывает интервал, устанавливая как детерминированные разряды, так и используя состояния множественности и неопределённости. Зона сплошной неопределённости в конце числа подчеркнута линией. Согласно правилам постбинарного компьютеринга, данный тетракод декодируется в два диапазона:

- минимальный: $[29,461\text{ }^\circ\text{C}; 30,195\text{ }^\circ\text{C}]$ со средним значением $29,828\text{ }^\circ\text{C}$;
- максимальный: $[28,188\text{ }^\circ\text{C}; 31,469\text{ }^\circ\text{C}]$ со средним значением $29,829\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 2. Кодирование и декодирование температуры на базе формата $Pb64/32p$ ($N = 16, K = 12$)

	t, °C	Разряды числа
x_L	29,46	0 10000011 11010111010111000010100
x_R	30,2	0 10000011 11100011001100110011010
$T_{Pb64/32p}$		0 10000011 11MA0A110AMAAAAAAAAAAAM0
x_{Lmin}	29,461	0 10000011 11010111010111111111100
x_{Rmin}	30,195	0 10000011 11100011001000000000010
x_{Lmax}	28,188	0 10000011 11000011000000000000000
x_{Rmax}	31,469	0 10000011 11110111011111111111110

Таким образом, границы минимального декодированного интервала соответствуют исходным с точностью до шага квантования. Максимальный интервал имеет больший охват и, соответственно, гарантирует большее количество случайных флуктуаций, которые могут выйти даже за пределы трёх стандартных отклонений. Центры обоих интервалов согласно (4) с точностью до Δ соответствуют результату измерений.

Для моделирования высокой динамики принят сценарий стремительного повышения температуры с $29,56\text{ }^\circ\text{C}$ до $34,6\text{ }^\circ\text{C}$, при котором среднее значение составляет $32,08\text{ }^\circ\text{C}$. Поскольку большая температура находится в следующей бинаде после границы $32 = 2^5$, целая часть будет занимать на 1 старший разряд мантиссы больше. Следовательно, K уменьшен на 1 и выбран равным 11. Результат кодирования в тетракод $T_{Pb128/32ip}$ и обратного декодирования показан в таблице 3.

Таблица 3. Кодирование и декодирование температуры на базе формата $Pb128/32ip$ ($N = 16, K = 11$)

	t, °C	Разряды числа
x_L	29,56	0 10000011 110110001111010111000 01
x_R	34,6	0 10000100 000101001100110011001 10
$T_{Pb128/32ip}$		0 10000011 AA01AM0011AAAAAAAAAAA 0 10000100 AA01AM0011AAAAAAAAAAA A11M
x_{Lmin}	29,563	0 10000011 11010111010111111111 00
x_{Rmin}	34,594	0 10000011 111000110010000000000 10
x_{Lmax}	17,047	0 10000011 110000110000000000000 00
x_{Rmax}	59,625	0 10000011 11110111011111111111 10

Из таблицы видно, что данный формат занимает в памяти 64 разряда и хранит границы отдельно. В контексте физического сигнала мантиссы сохранены единообразными (также с зоной множественности в конце каждой мантиссы), поэтому постбинарный интервал декодируется двоичные диапазоны со следующими значениями:

- минимальный: [29,563 °C; 34,594 °C] со средним значением 32,079 °C;
- максимальный: [17,047 °C; 59,625 °C] со средним значением 38,336 °C.

Результаты соответствуют описанию модели. Минимальные границы и среднее значение восстановлены с точностью до шага квантования Δ и крайне близки к исходным величинам (при округлении даже равны им). Для максимальных границ подтвердилось ограничение о восстановлении точечного значения.

Таким образом, модель корректно описывает состояние измерительного канала в определённый период времени. Данное кодирование имеет преимущество перед стандартными подходами. Интервальное представление на базе двоичной логики предполагает использование одного из двух способов:

- хранение математического ожидания с расстоянием до границы в виде отдельных 32-разрядных чисел на базе стандарта IEEE 754;
- запись границ интервала в 64-разрядный формат стандарта IEEE 1788 в качестве отдельных значений (поскольку в основе находятся числа стандарта IEEE 754).

Использование постбинарного компьютеринга, напротив, позволяет обеспечить семантическую целостность (атомарность) данных, что будет сохранено во всех дальнейших действиях с тетракодом.

При этом в тетракоде прослеживается структура шума, поскольку она определяется как детерминированными состояниями 0-«ложь» и 1-«истина», так и новыми состояниями M-«множественность» и A-«неопределённость». Дополнительная информация в виде погрешности в момент измерения позволит крайне эффективно проводить диагностику датчика, поскольку для определения достаточно использовать операции сдвига и наложения тетритной маски. Так, усиление шумовой составляющей может сообщить о проблемах монтажа (высокий шум питания), показать наличие внешних воздействия (например, в результате электромагнитных полей) или свидетельствовать о деградации датчика с целью своевременной его замены.

Выводы. В результате работы создана модель адаптивного представления стохастических сенсорных данных, позволяющая кодировать результат измерения вместе с шумовой составляющей в процессе измерения. Такой подход к хранению данных обеспечивает гибкость в задачах мониторинга и управления информацией. Дальнейшие направления работы ориентированы на разработку метода, который позволит формализовать правила определения объёма выборки, симметризации изначально асимметричных интервалов и нахождения пороговой величины K , а также экспериментальную проверку на прототипе постбинарной сенсорной системы.

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. Аноприенко, А. Я. Анализ эффективности устройств сенсорной составляющей образовательной системы умного города / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Е. И. Приходченко // Информатика и кибернетика. – 2020. – № 1(19). – С. 5-11.

3. A new generation cyber-physical system: A comprehensive review from security perspective / S. Rani, A. Kataria, S. Kumar, V. Karar // *Computers & Security*. – 2025. – Vol. 148. – Article 104095. – DOI: 10.1016/j.cose.2024.104095.
4. Койбаш, А. А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры / А. А. Койбаш // *Информатика и кибернетика*. – 2019. – № 2(16). – С. 51-57.
5. Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров // *Информатика и кибернетика*. – 2021. – № 1–2 (23–24). – С. 14-21.
6. Койбаш, А. А. Анализ эффективности модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем / А. А. Койбаш // *Информатика и кибернетика*. – 2023. – № 1(31). – С. 50-58.
7. IEEE Standard for Interval Arithmetic // *IEEE Std 1788-2015*. – 2015. – P. 1-97. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7140721.
8. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic (Revision of IEEE Std 754-2019) // *IEEE Standards Association*. – 2019. – P. 1-84.
9. Аноприенко, А. Я. Введение в постбинарный компьютинг. Арифметикологические основы и программно-аппаратная реализация / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница. – Донецк: ДонНТУ. – УНИТЕХ, 2017. – 308 с.
10. Иваница, С. В. Обоснование закономерностей, арифметико-логических алгоритмов и структур систем компьютерной обработки информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Иваница Сергей Васильевич // *Донецкий национальный технический университет*. – Донецк, 2019. – 226 с.
11. Койбаш, А. А. Программная реализация и симуляционное моделирование модифицированного алгоритма измерения для сенсорных систем / А. А. Койбаш // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и Технические науки»*. – 2025. – № 12. – С. 61-67.
12. Койбаш, А. А. Программно-аппаратная реализация инфраструктуры сбора и обработки интервальных данных с использованием принципов постбинарного кодирования / А. А. Койбаш, Т. В. Завадская, А. В. Койбаш // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. – 2025. – № 4. – С. 122-129. – DOI 10.5281/zenodo.18229844. – EDN HBDQIK.

REFERENCES LIST

1. Koibash, A. A. Zakonomernosti razvitiia sensornoi sostavliaiushchei mobilnykh kompiuternykh sistem / A. A. Koibash, N. S. Maksimenko, K. A. Sidorov // *Informatsionnye tekhnologii, sistemnyi analiz i upravlenie (ITSAU-2020): sbornik trudov KhVIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (Taganrog, 3–5 dekabria 2020 g.): v 3 t. / Iuzhnyi federalnyi universitet*. – Rostov-na-Donu; Taganrog: Izdatelstvo IuFU, 2020. – T. 1. – 284 s.
2. Anoprienko, A. Ia. Analiz effektivnosti ustroystv sensornoi sostavliaiushchei obrazovatelnoi sistemy umnogo goroda / A. Ia. Anoprienko, A. A. Koibash, E. I. Prikhodchenko // *Informatika i kibernetika*. – 2020. – № 1(19). – S. 5-11.
3. A new generation cyber-physical system: A comprehensive review from security perspective / S. Rani, A. Kataria, S. Kumar, V. Karar // *Computers & Security*. – 2025. – Vol. 148. – Article 104095. – DOI: 10.1016/j.cose.2024.104095.
4. Koibash, A. A. Puti povysheniia effektivnosti ustroystv sensornoi sostavliaiushchei informatsionno-kompiuternoi infrastruktury / A. A. Koibash // *Informatika i kibernetika*. – 2019. – № 2(16). – S. 51-57.
5. Zakonomernosti razvitiia inertsiialnykh datchikov informatsionno-kompiuternoi infrastruktury / A. Ia. Anoprienko, A. A. Koibash, N. S. Maksimenko, K. A. Sidorov // *Informatika i kibernetika*. – 2021. – № 1–2 (23–24). – S. 14-21.
6. Koibash, A. A. Analiz effektivnosti modifitsirovannogo algoritma izmereniia fizicheskikh velichin dlia sensorykh sistem / A. A. Koibash // *Informatika i kibernetika*. – 2023. – № 1(31). – S. 50-58.
7. IEEE Standard for Interval Arithmetic // *IEEE Std 1788-2015*. – 2015. – P. 1-97. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7140721.
8. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic (Revision of IEEE Std 754-2019) // *IEEE Standards Association*. – 2019. – P. 1-84.
9. Anoprienko, A. Ia. Vvedenie v postbinarnyi kompiuting. Arifmetikologicheskie osnovy i programmno-apparatnaia realizatsiia / A. Ia. Anoprienko, S. V. Ivanitsa. – Donetsk: DonNTU. – UNITEKh, 2017. – 308 s.
10. Ivanitsa, S. V. Obosnovanie zakonomernostei, arifmetiko-logicheskikh algoritmov i struktur sistem kompiuternoi obrabotki informatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.01 / Ivanitsa Sergei Vasilevich // *Donetskii natsionalnyi tekhnicheskii universitet*. – Donetsk, 2019. – 226 s.

11. Koibash, A. A. Programmnaia realizatsiia i simuliatsionnoe modelirovanie modifitsirovannogo algoritma izmereniia dlia sensorykh sistem / A. A. Koibash // *Sovremennaiia nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki*: Seriiia «Estestvennye i Tekhnicheskie nauki». – 2025. – № 12. – S. 61-67.
12. Koibash, A. A. Programmno-apparatnaia realizatsiia infrastruktury sbora i obrabotki intervalnykh dannykh s ispolzovaniem printsipov postbinarnogo kodirovaniia / A. A. Koibash, T. V. Zavadskaiia, A. V. Koibash // *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta*. Seriiia G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 4. – S. 122-129. – DOI 10.5281/zenodo.18229844. – EDN HBDQIK.

Поступила в редакцию 20.11.2025 г., рекомендована к изданию 19.01.2026 г.

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ADAPTIVE REPRESENTATION OF STOCHASTIC SENSOR DATA IN A TETRALOGICAL BASIS

Koibash A.A., Zavadskaiia T.V., Malcheva R.V.

A model for the adaptive representation of stochastic sensor data using the principles of post-binary encoding is presented. A mechanism for selecting a tetralogical format depending on signal fluctuations has been developed, based on introducing a threshold value for mantissa quantization. Atomic storage of the expected value of measurement results along with their noise component has been implemented. Using a digital twin of a thermistor, the correctness of the model and the efficiency of the proposed approach in both stationary and highly dynamic conditions have been experimentally confirmed.

Keywords: sensor data, measurement, post-binary computing, tetralogic, interval data.

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 at Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0003-4216-1438

Завадская Татьяна Владимировна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной инженерии ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: tatyana.zavadskaja@gmail.com

Zavadskaiia Tatiana Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0001-9634-3865

Мальчева Раиса Викторовна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной инженерии ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: raisa.malcheva@yandex.ru

Malcheva Raisa Viktorovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0003-4983-8878

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОЦЕНКИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2026 *Кравченко Н.М., Чернядьев И.В., Бондарчук В.В.*

Эмоциональные состояния человека выступают ключевым элементом взаимодействия с окружающим миром, влияя на принятие решений, социальные коммуникации и профессиональную деятельность. В условиях роста требований к персонализированным решениям в медицине, образовании и цифровых сервисах возникает необходимость в разработке интеллектуальных систем, способных комплексно анализировать и интерпретировать психоэмоциональное состояние человека. Данная работа посвящена созданию программно-аппаратного комплекса, предназначенного для автоматизированного мониторинга и анализа широкого спектра психофизиологических показателей. Система объединяет методы обработки мультимодальных данных с алгоритмами машинного обучения, что позволяет выявлять сложные эмоциональные паттерны. Актуальность системы обусловлена растущим спросом на технологии, способные интегрироваться в реальные сценарии профилактики психических расстройств. В отличие от узкоспециализированных решений, данная система ориентирована на масштабируемость и адаптивность. Перспективы развития проекта связаны с расширением спектра обрабатываемых данных, а также внедрением методов аналитики для анализа психоэмоционального состояния пользователей. Внедрение подобных систем способно стать основой для создания интеллектуальных сред, адаптирующихся к индивидуальным потребностям человека.

Ключевые слова: глубокое обучение, искусственный интеллект, распознавание эмоций, компьютерное зрение, обработка естественного языка.

Введение. Эмоции представляют собой сложные психофизиологические явления, которые играют ключевую роль в адаптации человека к окружающей среде. Они отражают субъективное восприятие событий, формируют основу для принятия решений и выступают предикторами поведения в различных социальных и профессиональных ситуациях. Развитие технологий в области искусственного интеллекта открывает новые возможности для анализа и интерпретации эмоциональных состояний человека, что актуально для множества приложений, включая диагностику психологических расстройств, повышение эффективности взаимодействия человека с машинами. Предикторы эмоций представляют собой факторы, которые позволяют идентифицировать текущее эмоциональное состояние человека и прогнозировать его дальнейшую динамику. Моделирование предикторов эмоций требует использования сложных алгоритмов, способных выявлять скрытые зависимости между входными данными и соответствующими эмоциональными состояниями.

Современные технологии искусственного интеллекта активно развиваются, однако задача точного и устойчивого распознавания эмоций человека на основе визуальных данных остаётся сложной и актуальной. Эмоциональные выражения лица играют ключевую роль в межличностной коммуникации и могут предоставлять ценную информацию о психоэмоциональном состоянии человека, его мотивации и реакции на внешние стимулы [1-2].

Задачей системы [3] является автоматизированное прогнозирование эмоций посредством программно-алгоритмического обеспечения, а также выявление степени

пребывания диагностируемых в различных психоэмоциональных состояниях: степени выраженности сниженного настроения – субдепрессии; выраженности признаков нервно-психического напряжения и ситуативной тревожности; определение состояния фрустрации и уровня социальной фрустрированности; личной соревновательной тревожности; накопления эмоционально-энергетических зарядов, направленных на самого себя; профессионального выгорания; определение уровня его выгорания; выявление психологических особенностей человека с осознанными и неосознанными мотивами и побуждениями к деятельности. В системе реализована функция немедикаментозной коррекции нарушений, не требующих специализированного медицинского вмешательства.

Анализ предшествующих работ. Исследования в области распознавания эмоций имеют глубокие корни в психологии и нейрофизиологии. Одним из фундаментальных вкладов стала теория дифференциальных эмоций Кэрролла Изарда, предложившего классификацию базовых эмоций (интерес, радость, удивление, печаль, гнев, отвращение, презрение, страх, стыд, вина), которые рассматриваются как универсальные и биологически обусловленные паттерны [4]. Работы Изарда подчеркивают связь эмоций с мимикой, физиологическими реакциями и поведением, что заложило основу для автоматизированного анализа эмоциональных состояний.

Статья [5] рассматривает применение трансферного обучения языковой модели BERT для анализа текстовой информации. Авторы демонстрируют, как использование предварительно обученных моделей может значительно повысить точность классификации. Статья [6] представляет набор методов и улучшений, которые позволяют повысить производительность сверточных нейронных сетей для классификации изображений. Авторы демонстрируют, как простые изменения в архитектуре и обучении могут привести к значительным улучшениям в точности, акцентируя внимание на практических аспектах реализации и оптимизации моделей.

Статья [7] акцентирует внимание на методах распознавания выражений лиц с использованием CNN. Обсуждаются ключевые аспекты проектирования моделей и их применение в реальных сценариях, а также методы борьбы с дисбалансом классов.

Методы и материалы исследования. Для организации хранения данных системы выбрана объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL, так как эта открытая СУБД обеспечивает достаточную целостность и надежность данных и позволяет создавать на своей основе отказоустойчивые приложения. При разработке системы использовались следующие программные средства: PostgreSQL – объектно-реляционная система управления базами данных; Sequelize – ORM-технология, создающая «виртуальную модель» базы данных; Node.js – программная платформа, основанная на движке V8, транслирующем JavaScript в машинный код [8]; Express.js – web-фреймворк для приложений Node.js. Node.js и Express.js являются основой для серверной части (backend) разрабатываемого проекта; Vue.js – JavaScript-фреймворк для создания пользовательских интерфейсов. Является основой клиентской части (frontend) данного приложения; Bootstrap 4 – фреймворк для верстки адаптивного дизайна web-приложения; OpenCV – библиотека компьютерного зрения Python; TensorFlow – открытая программная платформа для машинного обучения; Keras – библиотека для высокоуровневого взаимодействия с искусственными нейронными сетями [9]; Pandas и NumPy – библиотеки Python для обработки и анализа данных; PyTorch – фреймворк машинного обучения; transformers – библиотека, которая предоставляет широкий спектр предварительно обученных моделей, в первую очередь ориентированных на обработку естественного языка.

Серверная часть приложения, реализованная на платформе Node.js, обеспечивает обработку клиентских запросов. Для взаимодействия с объектно-реляционной базой данных PostgreSQL используется механизм ORM Sequelize, который абстрагирует доступ к данным, трансформируя объекты JavaScript в реляционные структуры и обратно. Важным аспектом системы является интеграция модулей машинного обучения: при получении графических данных сервер передает изображения в Python-модули, где библиотека OpenCV выполняет предобработку, а нейросеть анализирует паттерны для классификации эмоций. Текстовые данные отдельно обрабатываются дообученной версией русскоязычной модели BERT, адаптированной через библиотеку Transformers, которая генерирует эмбединги для последующей классификации эмоционального окраса. Результаты распознавания, возвращаемые серверу, сохраняются в PostgreSQL и передаются клиентской части, реализованной на Vue.js с использованием Bootstrap для адаптивной верстки.

По степени доступа к данным и функциональным возможностям системы все пользователи делятся на несколько категорий (ролей): внешний пользователь – наиболее широкая категория; любой человек, для которого представляет интерес возможность самодиагностики и улучшения своего психоэмоционального состояния безмедикаментозными средствами, может зарегистрироваться в системе, пройти выбранные им тесты, оценить воздействие средств арт-терапии, музыкотерапии; можно просмотреть и сохранить в виде протокола историю своей диагностики за выбранный период времени; специалист – психолог, врач-психотерапевт, психиатр; ведет учет (регистрирует) своих пациентов, подбирает для каждого подходящие диагностические методики, после прохождения пациентом тестов оценивает их результаты, назначает лечение, наблюдает за изменением состояния пациента; может пополнять базу данных методик; пациент – пользователь, зарегистрированный специалистом; проходит тестирование по назначенным специалистом диагностическим методикам; руководитель организации – пользователь, который представляет определенную организацию (предприятие, учебное заведение и т.п.), вносит сведения о своей организации и ее составных частях (отдельных трудовых коллективах) в базу данных, оценивает психологический климат, сложившийся в организации в целом или в отдельных подразделениях (результаты анонимного опроса пользователей, входящих в трудовые коллективы); администратор – пользователь, имеющий право доступа к справочной части базы данных, так же, как и Специалист, может добавлять в базу сведения о новых диагностических методиках, изменять права других пользователей (роль в системе), создавать для них новый пароль взамен утраченного, создавать резервные копии базы данных и восстанавливать БД случае сбоев. Схематически возможности, предоставляемые пользователям разных ролей для системы диагностирования и немедикаментозной саморегуляции психоэмоциональных состояний личности, представлены на рис. 1.

Можно сформулировать, что задача автоматизированной диагностики психоэмоциональных состояний с использованием программно-алгоритмического обеспечения заключается в сборе и обработке данных через различные методики тестирования для формирования точных диагностических заключений. Формирование справочников обеспечивает создание отчетов по отдельным сеансам и группам пациентов, а также отслеживание динамики результатов тестов. Система диагностики и терапии создает мощный инструмент, который помогает эффективно отслеживать и корректировать психоэмоциональные состояния клиентов, обеспечивая их комплексную поддержку и реабилитацию [10-21].

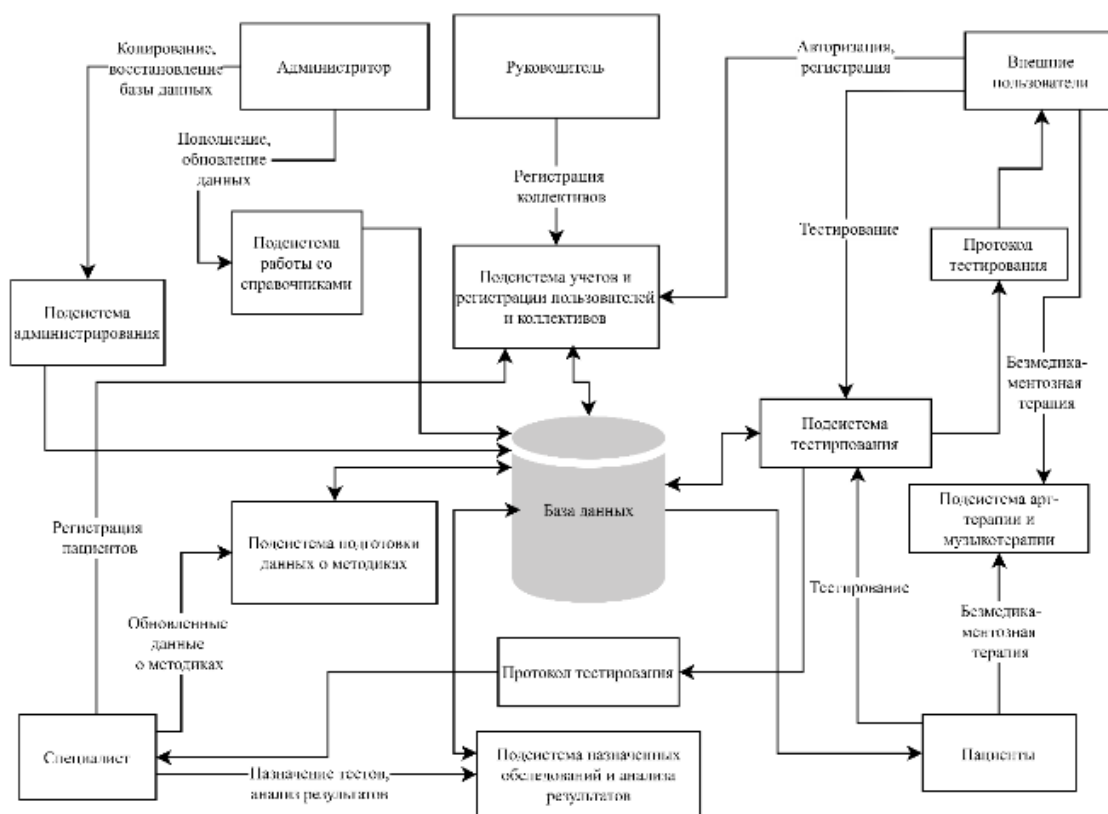


Рис. 1. Схема интеллектуальной платформы для оценки и стабилизации психоэмоционального состояния человека с использованием глубокого обучения

Также для системы был реализован модуль автоматического анализа эмоционального окраса текста, основанный на использовании предобученной языковой модели. В реализации проекта использовалась `rubert-tiny`, которая предлагает архитектуру модели с существенным уменьшением числа параметров. Это облегчённая версия модели `bert-base-multilingual-cased`, которая, в свою очередь, является адаптацией модели BERT для 104 языков [22]. Размер эмбединга был уменьшен с 768 до 312, а количество слоев сократилось с 12 до 3. Это сделано для снижения вычислительных затрат и увеличения скорости работы модели. Исходный словарь содержал 120000 токенов, но был сокращён до 30000, чтобы оставить только наиболее часто встречающиеся слова в русском и английском языках.

`Rubert-tiny` предназначена для быстрого выполнения задач классификации текста, при меньших затратах вычислительных ресурсов [23].

Тонкая настройка данной модели, по сути, является актом адаптации этого обобщенного инструмента для специализированной работы. В результате требуется гораздо меньше времени для обучения модели – как будто мы уже обучили нижние слои нашей сети и нам нужно только аккуратно настроить их, используя их вывод в качестве признаков для нашей задачи классификации. Кроме того, из-за предварительно обученных весов этот метод позволяет нам точно настроить нашу задачу на гораздо меньшем наборе данных, чем это потребовалось бы в модели, созданной с нуля.

Распознавание эмоций по изображениям лиц является отдельной задачей. Набор данных для обучения нейронной сети представляет собой таксономию, состоящую из директорий, каждая из которых обозначена меткой соответствующей эмоции.

Внутри каждой директории располагаются фотографии лиц, демонстрирующих характерные для названия папки эмоции. Всего набор данных включает в себя 8 категорий, в которых 18000 изображений, распределенных на приблизительно одинаковое количество между классами.

Это необходимо для снижения риска переобучения, так как при обучении на несбалансированных данных модель может склониться к преобладанию одного класса, что негативно сказывается на её способности обрабатывать данные. Для решения данной задачи была реализована оптимизированная версия архитектуры сверточной нейронной сети ResNet18. Выбор данной модели обусловлен особенностью исходных данных: малое разрешение изображений (48×48) требует сохранения пространственной информации, что затруднительно в более глубоких сетях (например, ResNet с 50+ слоями). Глубокие архитектуры сильно уменьшают размерность данных через последовательные свертки и пулинг-слои, что приводит к потере критически важных деталей на изображениях. В отличие от них, модифицированная ResNet18 обеспечивает баланс между емкостью модели и сохранением информации благодаря следующим изменениям: 1) первый слой с ядром 7×7 и шагом 2 (из оригинальной ResNet) заменен на слой с ядром 3×3 и шагом 1. Это предотвращает преждевременное уменьшение разрешения и сохраняет мелкие детали. 2) был исключен четвертый блок слоев, чтобы избежать избыточного уменьшения размерности [6-7]. 3) Замена Batch Normalization на Group Normalization (GN). В задачах анализа эмоций распределение данных может существенно различаться. Благодаря GN модель становится более адаптивной к новым данным.

Результаты и их обсуждение. Результаты трансферного обучения облегченной версии русскоязычной LLM-модели BERT представлены в табл. 1.

Таблица 1. Количественная оценка точности распознавания эмоций (precision, recall, F1-score)

Название класса	precision	recall	F1-score
Нейтральность	0.77	0.75	0.76
Позитив	0.83	0.79	0.80
Негатив	0.75	0.71	0.73

Значение ассюрасу (общей точности) на тестовой выборке составляет 79%, что является хорошим результатом и подтверждает способность нейросети стабильно корректно определять эмоциональный окрас текста. Использование облегченной версии модели BERT позволило сохранить высокое качество классификации без значительной потери в точности, при этом сохранив вычислительную эффективность. Благодаря меньшему количеству параметров, модель успешно работала на оборудовании с ограниченными ресурсами, что позволило избежать проблем с перегрузкой GPU. Результаты обучения сверточной нейросети представлены в табл. 2.

Таблица 2. Метрики качества классификации (precision, recall, F1-score) по классам

Название класса	precision	recall	F1-score
Нейтральность	0.70	0.69	0.69
Радость	0.89	0.90	0.89
Гнев	0.74	0.70	0.72
Презрение	0.72	0.67	0.69
Отвращение	0.62	0.65	0.63
Страх	0.79	0.75	0.77
Грусть	0.77	0.76	0.76
Удивление	0.83	0.80	0.81

Значение ассигасу на тестовой выборке составляет 75%. Модель способна выявлять сложные паттерны и текстуры, которые характерны для различных эмоциональных выражений. Это позволяет не только точно классифицировать эмоции, но и адаптироваться к различным условиям освещения и выражениям, что делает нейронную сеть более устойчивой к вариациям в данных.

Был проведен опрос, в котором каждый должен был отметить, какие эмоции испытывают люди на фотографиях. В опросе принимали участие более двухсот человек. Выбирать можно было одновременно несколько категорий. В табл. 3 в первом столбце записаны результаты опроса всех пользователей системы, принявших участие. Каждому участнику подавался одинаковый набор фотографий, затем варианты того, что это за эмоция, фиксировались и оставались в системе. В правом столбце – предсказание эмоций от нейросети для аналогичных фотографий.

Таблица 3. Сравнительный анализ распознавания эмоций сверточной нейросетью

Результат опроса пользователей	Вывод нейросети
Презрение (42.1%); Нейтральность(42.1%) Радость (26.3%);	Презрение (66.3%); Нейтральность (30.03%); Радость (2.55%);
Печаль (38.9%); Гнев (33.3%); Страх (16.7%);	Печаль (40.82%); Гнев (30.02%); Страх (23.2%)
Печаль (57.9%); Нейтральность (21.1%); Страх (15.8%)	Печаль (41.92%); Нейтральность (40.78%); Страх (7.22%);
Удивление (57.9%); Гнев (15.8%); Страх (15.8%);	Удивление (43.2%); Гнев (25.97%); Страх (17.37%);
Удивление (63.2%); Нейтральность (31.6%) Страх (21.1%);	Удивление (24.74%); Нейтральность (24.06%); Страх (21.75%);
Нейтральность (68.4%) Презрение (36.8%); Удивление (10.5%);	Нейтральность (79.96%); Презрение (12.27%); Удивление (0.88%);
Удивление (72.2%); Страх (44.4%); Гнев (11.1%);	Удивление (56.68%); Страх (25.14%); Гнев (1.25%);

Результаты сравнительного анализа пользовательских оценок и предсказаний нейросети демонстрируют статистически значимую согласованность в идентификации эмоциональных паттернов на визуальных данных. Как показано в табл. 3, среднее отклонение между процентным распределением категорий, выбранных пользователями, и вероятностными оценками модели составляет 13%. Данный результат подтверждает, что нейросеть эффективно детектирует эмоциональные паттерны, совпадающие с когнитивными паттернами человеческого восприятия. Например, для четвертого изображения, где базовой эмоцией является удивление, 57.9% пользователей идентифицировали данную эмоцию как первичную, тогда как нейросеть присвоила ей максимальную вероятность в 43.2% (F1-score = 0.81), что еще раз указывает на высокую точность модели в классификации. При этом вторичные категории, предсказанные нейросетью, такие как "нейтральность" (25.97%) и "страх" (17.37%), совпадают в процентных пропорциях с ответами пользователей и отражают многокомпонентность эмоциональных состояний, характерную для естественных сценариев.

На рис. 2 показан результат прохождения теста ММРІ. Его задача – находить черты личности, которые связаны с психическими расстройствами. Это делает ММРІ полезным инструментом для всесторонней оценки психического здоровья. Компании-работодатели нередко используют этот тест при приеме на работу, в основном, чтобы убедиться, что кандидаты адекватны и не доставят проблем. Тест предназначен для оценки нескольких элементов личности кандидата. Эта оценка носит более клинический характер, чем обычный личностный тест, и построена на основе 10 различных клинических шкал. Интерпретация результатов осуществляется через сопоставление индивидуальных показателей с нормативными данными, представленными в виде Т-баллов.

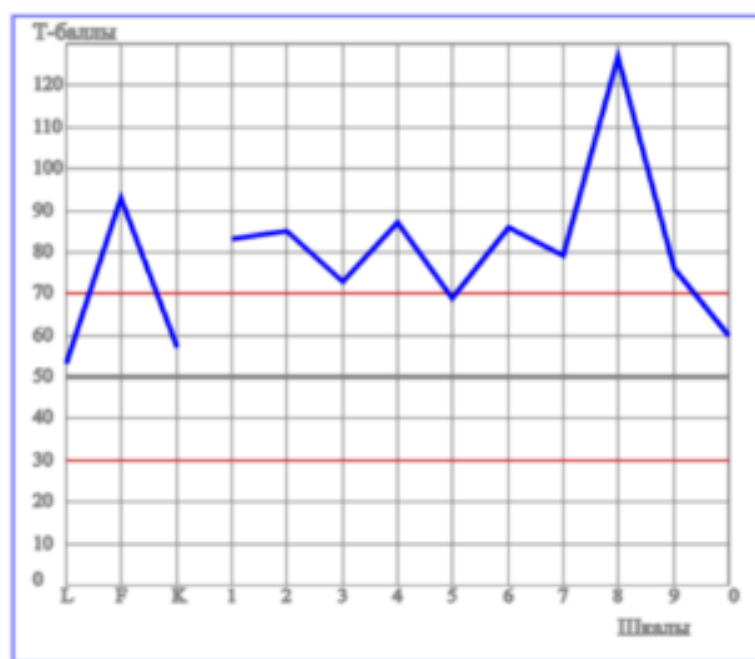


Рис. 2. Результаты прохождения пациентами теста ММРІ

На рис. 3 демонстрируется профиль пациента с диагностированными психическими расстройствами, где области, ограниченные красными линиями ($T = 30–70$), соответствуют условной норме, а выход за границы интерпретируется как клинически значимое отклонение. Подобная визуализация позволяет оперативно идентифицировать дисфункциональные паттерны, что согласуется с симптоматикой психических расстройств [24, 25]. Также в нем есть шкалы валидности, которые оценивают, насколько честными и точными были ответы кандидата.

На рис. 3 приведена история тестирования пользователя. Для некоторых тестов имеется ссылка "Подробнее", позволяющая получить более детальную информацию о результатах. Анализируя эти данные, можно сделать предварительные выводы о психологическом состоянии пользователя. Однако для более точной интерпретации необходимо учитывать контекст, в котором проводилось тестирование, а также индивидуальные особенности пользователя. Результаты теста ММРІ, представленные в виде Т-баллов, позволяют оценить психологические черты и состояния пользователя в разный период времени. Сопоставление результатов разных тестов и их динамики во времени может предоставить комплексную картину психологического состояния [26].

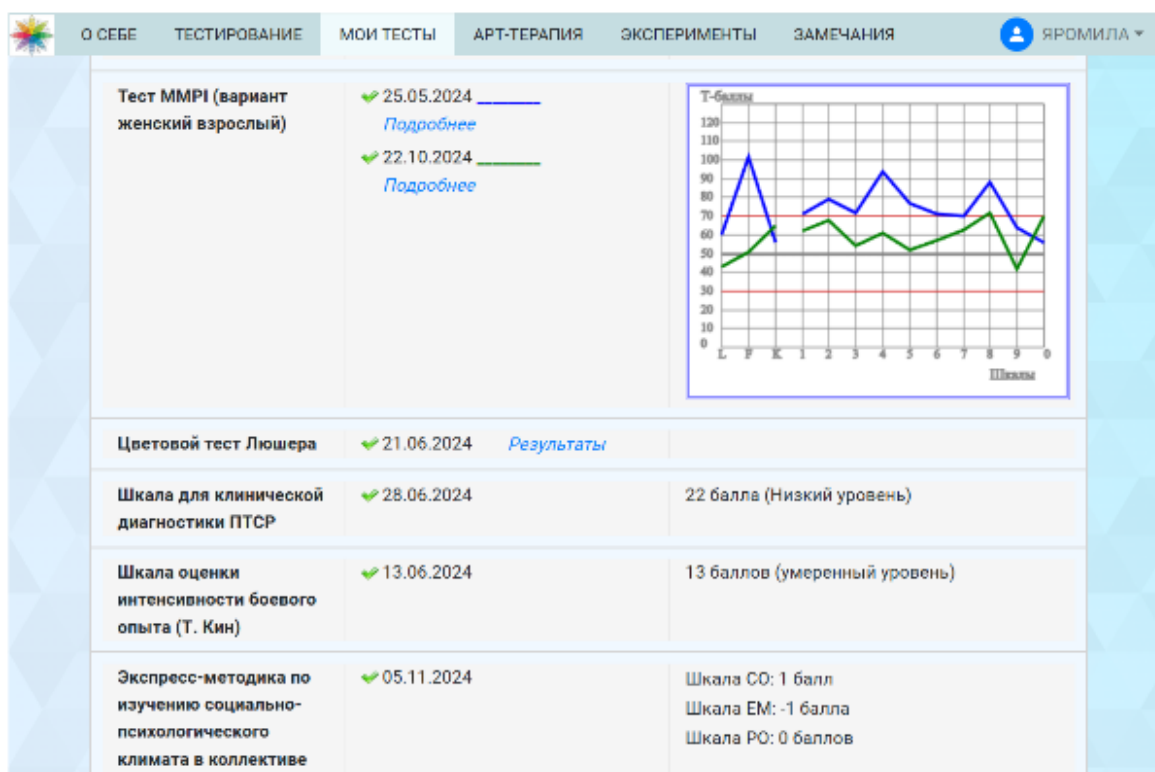


Рис. 3. Страница с пройденными тестами

Заключение. Разработанная система позволяет диагностировать психоэмоциональные состояния человека независимо от того, какое положение он занимает в социуме, является универсальной и может быть применена для тестирования как на производстве, так и в учреждениях и организациях различного профиля. Система является одной из систем, разгружающих мозг человека и его психику от нежелательных воздействий окружающей среды и жизненных ситуаций и восстанавливающих его психический статус здоровья, полагаясь на естественные возможности организма человека и, в частности, его нервной системы и мозга, применением автоматического построения таксономического ядра онтологии корпуса изображений, текстов и технологий нейросетей.

Использованы современные архитектуры CNN и собрана аннотированная коллекция изображений с эмоциями, такими как радость, грусть, гнев, удивление, страх, нейтральность. Реализована предобработка данных, включая нормализацию и аугментацию. Модель демонстрирует высокую точность и устойчивость к изменениям условий съемки. Перспективные направления исследований включают интеграцию в системы поддержки принятия решений, использование в медицине и социологии

В работе разработан модуль анализа онтологий текста для автоматического распознавания эмоционального состояния сотрудников предприятия. Создание инструмента для диагностики настроений внутри коллектива, что актуально для психологии и смежных областей. Использована современная архитектура BERT, а также собран объемный набор данных для настройки параметров модели. Таксономии текста делятся на три категории: нейтральный, позитивный, негативный. Модель способна улавливать контекст в предложениях и на его основе выдавать правильные ответы, что говорит о ее высокой точности.

Потенциал системы не ограничен только диагностикой эмоциональных состояний, ее можно интегрировать в системы поддержки принятия решений, применять в медицинских и социологических исследованиях [27]. Более того, система способна способствовать восстановлению психического здоровья человека, используя его естественные механизмы саморегуляции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ключанова, Т. Д. Предиктивный контроль прецизионных состояний когнитивного мониторинга / Т. Д. Ключанова, В. В. Бондарчук, И. В. Чернядьев // *Современные социально-экономические процессы: проблемы, тенденции и перспективы развития: монография* / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2024. – С. 197–209. – ISBN 978-5-00173.
2. Чернядьев, И. В. Системный анализ программного обеспечения концептуальной нейросетевой модели системы классификации эмоций на изображениях / И. В. Чернядьев, В. В. Бондарчук // *Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки*. – 2024. – № 08 (123), Т. 1. – С. 6–15. – DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2024.1.123.2109.
3. Диагностика психоэмоционального состояния. Безмедикаментозная саморегуляция [Электронный ресурс]. – URL: <http://psydiag.guiaidn.ru/> (дата обращения 20.11.2025).
4. Izard, C. E. *Patterns of emotions* / C. E. Izard. – New York: Academic Press, 1972. – 314 p. – ISBN 0-12-377750-X.
5. Wang, Z. A new computationally efficient method to tune BERT networks – transfer learning / Z. Wang // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2580. – P. 012012. – DOI 10.1088/1742-6596/2580/1/012012.
6. Bag of Tricks for Image Classification with Convolutional Neural Networks / T. He, Z. Zhang, H. Zhang [et al.]. – 2018. – P. 1–8.
7. Lonkar, S. Facial Expressions Recognition with Convolutional Neural Networks / S. Lonkar. – 2021. – P. 4–6.
8. Antiga, L. PyTorch. Освещающая глубокое обучение / L. Antiga, T. Viman, E. Stivens. – Санкт-Петербург: Питер, 2022. – 352 с. – ISBN 978-5-4461-1945-5.
9. Рашка, С. Python и машинное обучение / С. Рашка. – 2-е изд. – Москва: DMK-Press, 2021. – 312 с. – ISBN 978-5-97060-409-0.
10. Bobade, P. Stress Detection with Machine Learning and Deep Learning using Multimodal Physiological Data / P. Bobade, M. Vani // *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. – IEEE, 2020. – P. 51–57.
11. Bansal, M. Evolutionary Stress Detection Framework through Machine Learning and IoT (MLIoT-ESD) / M. Bansal, V. Vyas // *Recent Patents on Engineering*. – 2024. – DOI 10.2174/0118722121267661231013062252.
12. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future / F. Jiang, Y. Jiang, H. Zhi [et al.] // *Stroke and Vascular Neurology*. – 2017. – Vol. 2, no. 4. – P. 230–243.
13. Li, X. Dynamic calibration of self-efficacy to cognitive load: the longitudinal mediation effect of state anxiety / X. Li, M. Xia // *BMC Psychology*. – 2024. – Vol. 12. – P. 752. – DOI 10.1186/s40359-024-02254-y.
14. Effects of Texas State Agency Integration on Mental Health Service Use Among Individuals with Co-occurring Cognitive Disabilities and Mental Health Conditions / E. M. Stone, A. D. Jopson, N. J. Seewald [et al.] // *Community Mental Health Journal*. – 2025. – Vol. 61. – P. 111–121. – DOI 10.1007/s10597-024-01332-0.
15. Effect of combined physical–cognitive training on the functional and cognitive capacity of older people with mild cognitive impairment: a randomized controlled trial / Y. Castellote-Caballero, M. Carcelen-Fraile, A. Aibar-Almazan [et al.] // *BMC Medicine*. – 2024. – Vol. 22. – P. 281. – DOI 10.1186/s12916-024-03469-x.
16. Li, C. Cognitive training with adaptive algorithm improves cognitive ability in older people with MCI / C. Li, M. Li, Y. Shang // *Aging Clinical and Experimental Research*. – 2025. – Vol. 37. – P. 20. – DOI 10.1007/s40520-024-02913-5.
17. Zhu, Q. Correlation analysis and gender differences of cognitive function based on mini-mental state examination (MMSE) and suicidal tendency in patients with schizophrenia / Q. Zhu, X. Y. Zhang // *BMC Psychiatry*. – 2024. – Vol. 24. – P. 8. – DOI 10.1186/s12888-023-05462-9.
18. Yang, Q. Study on the age-period-cohort effects of cognitive abilities among older Chinese adults based on the cognitive reserve hypothesis / Q. Yang, T. Yu // *BMC Geriatrics*. – 2024. – Vol. 24. – P. 992. – DOI 10.1186/s12877-024-05576-z.

19. Social support and cognitive activity and their associations with incident cognitive impairment in cognitively normal older adults / T. Ma, J. Liao, Y. Ye [et al.] // *BMC Geriatrics*. – 2024. – Vol. 24. – P. 38. – DOI 10.1186/s12877-024-04655-5.
20. The State- and Trait-Level Effects and Candidate Mechanisms of Four Mindfulness-Based Cognitive Therapy (MBCT) Practices: Two Exploratory Studies / S. Maloney, C. Surawy, M. Martin [et al.] // *Mindfulness*. – 2023. – Vol. 14. – P. 2155–2171. – DOI 10.1007/s12671-023-02193-6.
21. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // *Proceedings of NAACL-HLT*. – 2019. – P. 4171–4186.
22. Салып, Б. Ю. Анализ модели BERT как инструмента определения меры смысловой близости предложений естественного языка / Б. Ю. Салып, А. А. Смирнов // *StudNet*. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 33.
23. Чернядьев, И. В. Системный анализ когнитивных динамических систем посредством глубокого обучения на основе текстовых данных / И. В. Чернядьев // *Научный диалог: теория и практика*. – 2025. – С. 147–154. – DOI 10.34660/INF.2025.17.34.057.
24. Elovainio, M. The effects of personal need for structure and occupational identity in the role stress process / M. Elovainio, M. Kivimaki // *The Journal of Social Psychology*. – 2001. – Vol. 141, no. 3. – P. 365–378. – DOI 10.1080/00224540109600558.
25. Preoperative cognitive training for the prevention of postoperative delirium and cognitive dysfunction: a systematic review and meta-analysis / K. T. Lau, L. C. S. Chiu, J. S. Y. Fong [et al.] // *Perioperative Medicine*. – 2024. – Vol. 13. – P. 113. – DOI 10.1186/s13741-024-00471-y.
26. Bondarchuk, V. V. Analytical review of artificial emotional intelligence systems: practical solutions: chapter 9 / V. V. Bondarchuk, N. M. Kravchenko // *Actual issues of modern society, science and education: monograph / under the general editorship of G. Y. Gulyaev*. – Penza: ICNS "Science and Enlightenment", 2023. – P. 134–145. – ISBN 978-5-00236-010-9.
27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611192 Российская Федерация. Программа для диагностирования психоэмоциональных состояний личности: заявл. 26.12.2024; опубл. 16.01.2025 / В. В. Бондарчук, Н. М. Кравченко, Т. Д. Ключанова, К. В. Ковалева; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта».

REFERENCES LIST

1. Kliushanova, T. D. Prediktivnyi kontrol pretsizionnykh sostoianii kognitivnogo monitoringa / T. D. Kliushanova, V. V. Bondarchuk, I. V. Cherniadev // *Sovremennye sotsialno-ekonomicheskie protsessy: problemy, tendentsii i perspektivy razvitiia: monografiia / pod obshch. red. G. Iu. Guliaeva*. – Penza: MTsNS «Nauka i Prosveshchenie», 2024. – S. 197–209. – ISBN 978-5-00173.
2. Cherniadev, I. V. Sistemnyi analiz programmnoho obespecheniia kontseptualnoi neurosetevoi modeli sistemy klassifikatsii emotsii na izobrazheniakh / I. V. Cherniadev, V. V. Bondarchuk // *Evraziiskii Soiuz Uchenykh. Seriia: tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. – 2024. – № 08 (123), Т. 1. – S. 6-15. – DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2024.1.123.2109.
3. Diagnostika psikhoeotsionalnogo sostoianii. Bezmedikamentoznaia samoregulatsiia [Elektronnyi resurs]. – URL: <http://psydiag.guiaidn.ru/> (data obrashcheniia 20.11.2025).
4. Izard, C. E. Patterns of emotions / C. E. Izard. – New York: Academic Press, 1972. – 314 p. – ISBN 0-12-377750-X.
5. Wang, Z. A new computationally efficient method to tune BERT networks – transfer learning / Z. Wang // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2580. – P. 012012. – DOI 10.1088/1742-6596/2580/1/012012.
6. Bag of Tricks for Image Classification with Convolutional Neural Networks / T. He, Z. Zhang, H. Zhang [et al.]. – 2018. – P. 1–8.
7. Lonkar, S. Facial Expressions Recognition with Convolutional Neural Networks / S. Lonkar. – 2021. – P. 4–6.
8. Antiga, L. PyTorch. Osveshchaia glubokoe obuchenie / L. Antiga, T. Viman, E. Stivens. – Sankt-Peterburg: Piter, 2022. – 352 s. – ISBN 978-5-4461-1945-5.
9. Rashka, S. Python i mashinnoe obuchenie / S. Rashka. – 2-e izd. – Moskva: DMK-Press, 2021. – 312 s. – ISBN 978-5-97060-409-0.
10. Bobade, P. Stress Detection with Machine Learning and Deep Learning using Multimodal Physiological Data / P. Bobade, M. Vani // *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. – IEEE, 2020. – P. 51–57.

11. Bansal, M. Evolutionary Stress Detection Framework through Machine Learning and IoT (MLIoT-ESD) / M. Bansal, V. Vyas // Recent Patents on Engineering. – 2024. – DOI 10.2174/0118722121267661231013062252.
12. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future / F. Jiang, Y. Jiang, H. Zhi [et al.] // Stroke and Vascular Neurology. – 2017. – Vol. 2, no. 4. – P. 230–243.
13. Li, X. Dynamic calibration of self-efficacy to cognitive load: the longitudinal mediation effect of state anxiety / X. Li, M. Xia // BMC Psychology. – 2024. – Vol. 12. – P. 752. – DOI 10.1186/s40359-024-02254-y.
14. Effects of Texas State Agency Integration on Mental Health Service Use Among Individuals with Co-occurring Cognitive Disabilities and Mental Health Conditions / E. M. Stone, A. D. Jopson, N. J. Seewald [et al.] // Community Mental Health Journal. – 2025. – Vol. 61. – P. 111–121. – DOI 10.1007/s10597-024-01332-0.
15. Effect of combined physical–cognitive training on the functional and cognitive capacity of older people with mild cognitive impairment: a randomized controlled trial / Y. Castellote-Caballero, M. Carcelen-Fraile, A. Aibar-Almazan [et al.] // BMC Medicine. – 2024. – Vol. 22. – P. 281. – DOI 10.1186/s12916-024-03469-x.
16. Li, C. Cognitive training with adaptive algorithm improves cognitive ability in older people with MCI / C. Li, M. Li, Y. Shang // Aging Clinical and Experimental Research. – 2025. – Vol. 37. – P. 20. – DOI 10.1007/s40520-024-02913-5.
17. Zhu, Q. Correlation analysis and gender differences of cognitive function based on mini-mental state examination (MMSE) and suicidal tendency in patients with schizophrenia / Q. Zhu, X. Y. Zhang // BMC Psychiatry. – 2024. – Vol. 24. – P. 8. – DOI 10.1186/s12888-023-05462-9.
18. Yang, Q. Study on the age-period-cohort effects of cognitive abilities among older Chinese adults based on the cognitive reserve hypothesis / Q. Yang, T. Yu // BMC Geriatrics. – 2024. – Vol. 24. – P. 992. – DOI 10.1186/s12877-024-05576-z.
19. Social support and cognitive activity and their associations with incident cognitive impairment in cognitively normal older adults / T. Ma, J. Liao, Y. Ye [et al.] // BMC Geriatrics. – 2024. – Vol. 24. – P. 38. – DOI 10.1186/s12877-024-04655-5.
20. The State- and Trait-Level Effects and Candidate Mechanisms of Four Mindfulness-Based Cognitive Therapy (MBCT) Practices: Two Exploratory Studies / S. Maloney, C. Surawy, M. Martin [et al.] // Mindfulness. – 2023. – Vol. 14. – P. 2155–2171. – DOI 10.1007/s12671-023-02193-6.
21. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // Proceedings of NAACL-HLT. – 2019. – P. 4171–4186.
22. Salyp, B. Iu. Analiz modeli BERT kak instrumenta opredeleniia mery smyslovoi blizosti predlozhenii estestvennogo iazyka / B. Iu. Salyp, A. A. Smirnov // StudNet. – 2022. – T. 5, № 5. – S. 33.
23. Cherniadev, I. V. Sistemnyi analiz kognitivnykh dinamicheskikh sistem posredstvom glubokogo obucheniia na osnove tekstovykh dannykh / I. V. Cherniadev // Nauchnyi dialog: teoriia i praktika. – 2025. – S. 147–154. – DOI 10.34660/INF.2025.17.34.057.
24. Elovainio, M. The effects of personal need for structure and occupational identity in the role stress process / M. Elovainio, M. Kivimaki // The Journal of Social Psychology. – 2001. – Vol. 141, no. 3. – P. 365–378. – DOI 10.1080/00224540109600558.
25. Preoperative cognitive training for the prevention of postoperative delirium and cognitive dysfunction: a systematic review and meta-analysis / K. T. Lau, L. C. S. Chiu, J. S. Y. Fong [et al.] // Perioperative Medicine. – 2024. – Vol. 13. – P. 113. – DOI 10.1186/s13741-024-00471-y.
26. Bondarchuk, V. V. Analytical review of artificial emotional intelligence systems: practical solutions: chapter 9 / V. V. Bondarchuk, N. M. Kravchenko // Actual issues of modern society, science and education: monograph / under the general editorship of G. Y. Gulyaev. – Penza: ICNS "Science and Enlightenment", 2023. – P. 134–145. – ISBN 978-5-00236-010-9.
27. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2025611192 Rossiiskaia Federatsiia. Programma dlia diagnostirovaniia psikhoemotsionalnykh sostoianii lichnosti: zaiavl. 26.12.2024: opubl. 16.01.2025 / V. V. Bondarchuk, N. M. Kravchenko, T. D. Kliushanova, K. V. Kovaleva; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe nauchnoe uchrezhdenie «Institut problem iskusstvennogo intellekta».

Поступила в редакцию 28.11.2025 г., рекомендована к изданию 20.01.2026 г.

AN INTELLIGENT PLATFORM FOR ASSESSING AND STABILIZING A PERSONS
PSYCHOEMOTIONAL STATE USING DEEP LEARNING

Kravchenko N.M., CHerniadev I.V., Bondarchuk V.V.

Emotional states of a person act as a key element of interaction with the outside world, influencing decision-making, social communication and professional activity. With increasing demands for personalized solutions in medicine, education, and digital services, there is a need to develop intelligent systems capable of comprehensively analyzing and interpreting a persons psychoemotional state. This work is devoted to the creation of a software and hardware complex designed for automated monitoring and analysis of a wide range of psychophysiological indicators. The system combines multi-modal data processing methods with machine learning algorithms, which makes it possible to identify complex emotional patterns. The relevance of the system is due to the growing demand for technologies that can be integrated into real-world scenarios for the prevention of mental disorders. Unlike highly specialized solutions, this system is focused on scalability and adaptability. The projects development prospects are related to the expansion of the range of processed data, as well as the introduction of analytical methods for analyzing the psycho-emotional state of users. The implementation of such systems can become the basis for creating intelligent environments that adapt to individual human needs.

Keywords: deep learning, artificial intelligence, emotion recognition, computer vision, natural language processing.

Кравченко Наталья Михайловна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела распознавания зрительных образов ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,
Российская федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: natali_kravchenko70@mail.ru

Kravchenko Natalia Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Department of Visual Image Recognition of Institute of Artificial Intelligence Problems, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0001-1661-1872

Чернядьев Иван Валерьевич

инженер-исследователь отдела распознавания зрительных образов ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,
Российская федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: chernyadev-i@mail.ru

CHerniadev Ivan Valerevich

Research Engineer at Department of Visual Image Recognition of Institute of Artificial Intelligence Problems, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0008-6557-1601

Бондарчук Виктория Валерьевна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела распознавания зрительных образов ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,
Российская федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: vv_bondar@mail.ru

Bondarchuk Viktoriia Valerevna

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Department of Visual Image Recognition of Institute of Artificial Intelligence Problems, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0007-1794-5309

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ПОДБОРА ОДЕЖДЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ПРОФИЛЯ

© 2026 *Салтанаева Е.А., Куценко С.М.*

Статья посвящена разработке и реализации мобильного приложения, представляющего собой персонализированную рекомендательную систему для адаптивного подбора гардероба. Разработанное приложение является практическим примером применения интеллектуальных систем для решения повседневных задач. Актуальность задачи обусловлена необходимостью учета множества факторов, влияющих на комфорт человека. Решение учитывает не только температуру, но и влажность, ветер, осадки, а также индивидуальную восприимчивость пользователя к холоду. Алгоритм анализирует свойства материалов одежды (термоизоляция, влагостойкость, ветрозащита) и корректирует рекомендации на основе результатов теста на восприимчивость пользователя к погоде. Приложение реализовано на Kotlin с использованием Android Studio, OpenWeatherMap API и Firebase. В заключении приведены перспективы развития системы.

Ключевые слова: рекомендательная система, мобильное приложение, персонализация, Android разработка.

Введение. Современные технологии, упрощающие повседневную жизнь человека, постепенно развиваются. Наблюдается постоянное расширение списка сфер, в которые внедрены устройства для минимизации выполнения рутинных задач. Проблемы, процесс решения которых, казалось бы, сложно автоматизировать, на данный момент предоставляются умным машинам и различным алгоритмам.

Одной из интересных и актуальных задач является создание интеллектуального рекомендательного приложения по подбору гардероба в зависимости от погодных условий [1].

При создании данных приложений следует учитывать, что на ощущение погоды влияет не только температура воздуха, но и другие параметры погодных условий: влажность, скорость и направление ветра, тип и количество осадков, количество солнца и так далее. После начала развития медицинской метеорологии появился термин «ощущаемая температура», в рамках которого наиболее важными факторами синоптики отмечают влажность и скорость ветра.

Тип и количество осадков также сильно влияют на выбор одежды. Материалы одежды тоже ведут себя по-разному: хлопок быстро намокает и долго сохнет, а синтетика воду отталкивает, но может плохо пропускать воздух. Возраст и индивидуальные особенности тоже сильно влияют на то, как человек воспринимает погоду и как ему одеваться. Таким образом, грамотный подбор одежды требует учёта множества факторов. Решением является персонализированная рекомендательная система для адаптивного подбора гардероба, реализованная в виде мобильного приложения [2].

Для предоставления персонализированных рекомендаций по одежде приложение использует сложный алгоритм, включающий в себя определение индивидуального уровня восприимчивости к холоду. Пользователь проходит несложный тест, который помогает приложению понять, как он реагирует на различные температурные режимы

и погодные явления, такие как ветер, влажность и осадки. Полученные данные используются для формирования точных и персонализированных рекомендаций.

Кроме того, приложение предлагает удобный инструмент для управления своим виртуальным гардеробом. Пользователь может создать подробный каталог собственной одежды, указав для каждого предмета не только название, но и материал, из которого он изготовлен. Для удобства идентификации приложение позволяет загрузить фотографии каждого элемента гардероба. Функционал приложения включает в себя также возможность редактирования гардероба: добавление новых вещей, удаление ненужных, а также полную очистку всего списка.

В процессе реализации основного функционала приложение выполняет дополнительные задачи, такие как создание индивидуального профиля пользователя, интеграция с погодными API, выбор материала и загрузка фотографии для каждого элемента одежды, возможность полностью очистить гардероб, удаление одного или нескольких элементов гардероба.

Объекты и методы исследования. Для реализации мобильного приложения была выбрана совокупность технологий, обеспечивающих стабильную работу, удобство разработки, а также масштабируемость и расширяемость проекта [3]. В качестве среды разработки используется Android Studio. Выбор этой среды обусловлен её полной поддержкой всех современных библиотек и компонентов Android, возможностью визуального проектирования интерфейсов, а также активным сообществом и регулярными обновлениями. Для разработки выбран язык программирования Kotlin [4]. Использование Kotlin позволяет ускорить процесс разработки, уменьшить количество шаблонного кода и снизить вероятность возникновения распространённых ошибок, таких как NullPointerException. Язык также упрощает реализацию асинхронных операций, например, загрузки данных из сети. Пользовательский интерфейс приложения реализуется с использованием XML-файлов, в которых описывается структура экранов, компоненты интерфейса и их параметры. Такой подход обеспечивает чёткое разделение логики приложения и визуального оформления, позволяет использовать визуальные инструменты проектирования в Android Studio и упрощает поддержку различных конфигураций устройств. XML-макеты позволяют создать интуитивно понятный и адаптивный интерфейс, что критически важно для мобильного приложения.

Для получения погодных условий, необходимых для формирования рекомендаций по одежде, используется один из общедоступных погодных API – OpenWeatherMap [5, 6]. Основными критериями выбора являются наличие бесплатного тарифа, простота интеграции, поддержка формата JSON, а также подробная документация. Через API получается информация о текущей температуре воздуха, ощущаемой температуре, уровне влажности, осадках, скорости ветра и других метеорологических параметрах [7]. Эти данные передаются в алгоритм, который формирует рекомендации гардероба на основе заданных правил.

Для хранения данных пользователя, истории подборов одежды, предпочтений и другой вспомогательной информации используется встроенная в Android платформа база данных SQLite. Это надёжная и проверенная технология, не требующая сетевого подключения и позволяющая эффективно управлять локальными данными. SQLite обеспечивает работу с таблицами и SQL-запросами, а при необходимости упрощения взаимодействия с базой данных может быть использован дополнительный слой абстракции – библиотека Room, предоставляющая доступ к данным через объектно-ориентированные интерфейсы.

Для реализации процесса регистрации и входа пользователей используется облачный сервис Firebase Authentication. Эта технология предоставляет готовую систему аутентификации, поддерживает авторизацию по электронной почте и паролю, а также интеграцию с другими способами входа (например, через Google-аккаунт). Firebase обеспечивает надёжную защиту пользовательских данных, их шифрование и безопасное хранение.

Выбор Firebase обусловлен его простой интеграцией с Android-приложениями, хорошей документацией и возможностью расширения функционала в будущем – в частности, добавлением облачного хранения, аналитики или уведомлений.

Результаты и их обсуждение. Программа позволяет выполнять следующие задачи:

- 1) Внесение данных о погодных условиях в реальном времени.
- 2) Внесение индивидуальных данных об имеющихся элементах гардероба.
- 3) Получение рекомендаций согласно метеорологическим условиям.

Входные данные представляют собой сведения о погодных условиях в зависимости от времени года и региона (если программа доступна только на территории Российской Федерации) или страны (если программа доступна по всему миру). В сведения о погодных условиях входят температура, скорость и направление ветра, вид и количество осадков. Также в качестве входных данных рассматриваются элементы гардероба, которые заполняются каждым пользователем индивидуально. Для полного заполнения элемента одежды необходимо ввести название, выбрать из выпадающего списка материал, из которого сделан элемент, и приложить фотографию (по желанию).

Входные данные об элементах одежды представлены в виде списка, для каждого пункта которого отображены обязательные для заполнения поля. Формат входных данных: текстовый, числовой, изображения. Способы кодирования входных данных: категориальный, числовой, текстовый, кодирование изображений. Входные данные об элементах одежды являются статичными, о погодных условиях – динамичными.

Выходными данными являются те элементы гардероба, свойство «Материал» которых соответствует введённым погодным условиям. Визуально отображается название элемента гардероба, его материал и фотография (при наличии).

После успешного входа в аккаунт пользователь получает доступ к основным функциям приложения: прохождение теста на восприимчивость к погоде с сохранением результатов, составление индивидуального гардероба и получение рекомендаций в зависимости от текущих погодных условий.

Всего в тесте пятнадцать вопросов, в каждом по четыре варианта ответа. Вопросы – это не редактируемые текстовые поля. А ответы представляют собой чек-боксы с двумя значениями: true и false. Кроме того, каждому ответу присвоен тэг с целочисленным значением от 0 до 3 включительно – это количество баллов, которое получит пользователь при выборе конкретного варианта ответа. В зависимости от того, сколько баллов набрал пользователь, ему присваивается определённый уровень восприимчивости («низкая», «средняя», «высокая» и «очень высокая») – чем больше баллов, тем сильнее восприимчивость. Подсчитанные баллы передаются в БД, чтобы в дальнейшем они были использованы в процессе работы алгоритма подбора рекомендаций, который учитывает не только информацию о погоде, но и индивидуальную восприимчивость к ней.

После того, как пользователь прошёл тест на чувствительность (это рекомендуется делать хотя бы раз в месяц, чтобы рекомендации не снижали уровень

точности), он может перейти к составлению индивидуального гардероба. Если пользователь не заполнит поле «Название элемента одежды», гардероб не создастся, появится соответствующее предупреждение о необходимости заполнения обязательных полей.

Логика хранения данных реализована при помощи двух подходов: локального и облачного. Локально гардероб сохраняется в SharedPreferences в формате JSON с использованием библиотеки Gson. При запуске приложения, если интернет недоступен или пользователь не авторизован, можно использовать эти локальные данные. Облачное хранилище реализовано на базе Firebase Firestore, и все изменения синхронизируются с сервером по уникальному идентификатору пользователя.

Когда тест на восприимчивость к погоде пройден, а элементы одежды добавлены в индивидуальный гардероб, можно приступать к составлению рекомендаций по погодным условиям на день. В файле разметки представлен ScrollView, в который добавлен контейнер с текстовыми полями для отображения данных о погоде из OpenWeather-Map и с редактируемым текстовым полем для ввода города.

Логика алгоритма рекомендаций для адаптивного подбора гардероба заключается в том, чтобы подобрать одежду на день, основываясь на пяти погодных параметрах: температуре, скорости ветра, направлении ветра, типе осадков, количестве осадков. Эти параметры и являются входными данными для вывода тех элементов гардероба, которые подходят по материалу. Также следует обратить внимание, что для корректной работы алгоритма необходима некоторая база данных с внесённой в неё информацией об элементах одежды и материалах каждого. Имея входные данные, алгоритм, использующий систему правил (if-elif-else), подбирает материал, наиболее подходящий погодным условиям, и выводит соответствующие рекомендации.

В коде используется класс данных Material, который представляет собой модель хранения информации о различных материалах одежды. В этом классе представлены несколько параметров: name (название материала), insulation (термоизоляция), moisture_resistance (влагостойкость), wind_protection (ветрозащита). Параметр name инициализирован как string. Такие параметры как insulation, moisture_resistance, wind_protection инициализированы как целочисленная переменная. Для каждого материала задаётся параметр типа Float от 1 до 10. Чем больше параметр, тем эффективнее конкретное свойство материала.

Следовательно, подобным способом можно создать список материалов с различными характеристиками. В алгоритме приводятся двадцать основных материалов: хлопок, шерсть, полиэстер, мембрана, пух, лён, нейлон, флис, деним, кожа, замша, акрил, шёлк, модал, бамбук, спандекс, синтепон, плащёвка, софтшелл [8, 9]. Этот список служит некоторой базой данных материалов, из которой будет выбираться наиболее подходящий.

Сначала из базы данных считывается результат прохождения пользователем теста на восприимчивость к погоде. Этот результат в дальнейшем будет использоваться для составления рекомендаций.

Далее происходит фильтрация по направлению ветра. Некоторые направления (север, северо-восток, северо-запад) усиливают ощущение холода. Поэтому, если ветер дует с севера, повышается приоритет ветрозащитных материалов.

Метод selectBestMaterial, в котором в качестве входных параметров выступают:

- а) temp – температура окружающей среды;
- б) windSpeed – скорость ветра;
- в) windDir – направление ветра;

- г) precipType – тип осадков (дождь, снег, нет осадков);
- д) precipAmount – количество осадков;
- е) weatherSensitivity – восприимчивость пользователя к погоде.

В этом методе количество баллов по результатам прохождения теста на восприимчивость превращается в коэффициент, который потом будет влиять на количество баллов по остальным параметрам. Следовательно, чем больше количество баллов, тем выше коэффициент, и наоборот, чем меньше количество баллов, тем ниже коэффициент.

Также, прежде чем прописывать сам алгоритм суммирования баллов для каждого материала, следует объявить материалы, обеспечивающие максимальную защиту от холода, чтобы при сильном ветре, но высокой температуре они не появлялись в топе рекомендаций.

Далее на основе погодных условий каждый материал получает оценку (score) на основе погодных условий: температура, скорость ветра, направление ветра, тип и количество осадков.

При высоких температурах ($temp > 20$) теплоизоляция учитывается с отрицательным коэффициентом. Это означает, что материалы с высокой теплоизоляцией получают «штрафные баллы». Чем выше теплоизоляция материала, тем хуже он подходит для жаркой погоды. Так алгоритм отсеивает слишком теплые материалы в жару. При умеренных температурах теплоизоляция учитывается с небольшим положительным коэффициентом (0.3), так как важность этого параметра в комфортную погоду невысокая. При прохладной погоде коэффициент увеличивается до 0.9, потому что теплоизоляция становится более важным фактором. При морозе (отрицательные температуры) коэффициент максимальный – 1.8 по причине того, что теплоизоляция становится критически важным параметром. Чувствительность пользователя дополнительно модифицирует оценку.

При сильном ветре (более 10 м/с) важность ветрозащиты усиливается, а при среднем ветре (5-10 м/с) стандартное значение снижается наполовину. В приоритете стоит ветрозащита материалов.

Если тип осадков «Дождь», то влагостойкость удваивается, так как нужен непромокаемый материал. Если тип осадков «Снег», влагостойкость добавляется, но не так критично. Также необходимо добавить исключение тёплых материалов при мягкой погоде, так как коэффициенты их параметров слишком высоки и конечная сумма баллов может превышать суммы более подходящих по погоде материалов. Из-за этого рекомендации потеряют точность.

После подсчёта баллы для каждого материала вносятся в массив. В конечном счёте из массива выбираются пять наиболее соответствующих погоде материалов, а по ним фильтруются элементы одежды. Если же элемента гардероба с подходящим материалом не находится, выводится сообщение «Нет подходящего элемента гардероба».

На примере нескольких вариантов входных данных можно детально проследить, как работает алгоритм, который будет выводить один наиболее подходящий погоде материал. Например, в первом случае пусть погодные условия будут походить на летний жаркий день (30 градусов) без осадков, второй случай погодных условий – дождливая осень с умеренным ветром (7 м/с), следующий случай рассматривается как суровый снегопад и штормовой ветер (15 м/с), последний общий случай, рассматриваемый в качестве погодных условий – весенний день с лёгким ветерком (5 м/с). Результаты работы алгоритма для разных погодных условий представлены на рисунке 1.

```
fun main() {
    val selector = ClothingSelector()

    val temp = 30
    val windSpeed = 3
    val windDir = "Юг"
    val precipType = "Нет осадков"
    val precipAmount = 0

    Рекомендуемый материал: Хлопок
}
```

а)

```
fun main() {
    val selector = ClothingSelector()

    val temp = 10
    val windSpeed = 7
    val windDir = "Запад"
    val precipType = "Дождь"
    val precipAmount = 4

    Рекомендуемый материал: Полиэстер
}
```

б)

```
fun main() {
    val selector = ClothingSelector()

    val temp = -5
    val windSpeed = 15
    val windDir = "Северо-запад"
    val precipType = "Снег"
    val precipAmount = 10

    Рекомендуемый материал: Пух
}
```

в)

```
fun main() {
    val selector = ClothingSelector()

    val temp = 15
    val windSpeed = 5
    val windDir = "Юго-восток"
    val precipType = "Нет осадков"
    val precipAmount = 0

    Рекомендуемый материал: Хлопок
}
```

г)

Рис. 1. Результат работы алгоритма для разных погодных условий:
а) для летнего жаркого дня; б) для дождливой осени с ветром;
в) для снегопада и сильного ветра; г) для весеннего дня с лёгким ветром

Заключение. Таким образом, была успешно разработана и реализована концепция интеллектуальной рекомендательной системы для адаптивного подбора гардероба, учитывающую комплекс факторов, как погодных, так и персональных.

Приложение было протестировано в течение двух недель в повседневной жизни. Участники проверяли его рекомендации в различных погодных условиях и ситуациях. Они фиксировали, насколько предложенные варианты одежды соответствовали реальным погодным условиям, их личным предпочтениям и требованиям к стилю. Особое внимание уделялось работе приложения в экстремальных погодных условиях, таких как сильный дождь, мороз или жара, так как именно в этих случаях точность рекомендаций особенно важна. По окончании тестового периода был проведен сбор и анализ полученных данных. Обратная связь показала, что большинство пользователей остались довольны точностью рекомендаций в стандартных погодных условиях, однако были выявлены некоторые проблемы при работе в условиях резких перепадов температуры. Также были зафиксированы технические проблемы, включая замедленную работу приложения при слабом интернет-соединении.

На основании собранной обратной связи был составлен список приоритетных доработок – оптимизация алгоритма подбора одежды для экстремальных погодных условий и улучшение обработки данных при слабом интернет-соединении. Также был переработан интерфейс приложения с учетом пожеланий пользователей по удобству навигации и наглядности отображения рекомендаций.

Среди дальнейших перспектив развития приложения можно отметить следующие: расширение базы знаний, использование машинного обучения для повышения точности предсказаний, интеграция с умным домом для учета микроклимата в помещении. Предложенная работа демонстрирует практическое применение интеллектуальных систем для решения повседневных персонализированных задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хабибрахманова, А. И. Ценность рекомендательных систем для пользователей и бизнеса / А. И. Хабибрахманова // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 6(167). – С. 819-822. – DOI 10.34925/EIP.2024.167.6.170. – EDN IJZJHL.
2. Эволюция в сфере разработки интеллектуальных систем и интеллектуальные адаптивные системы / Г. В. Коваленко, Ю. Ю. Михальчевский [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2023. – № 1(38). – С. 5-18. – EDN OURMNO.
3. Салтанаева, Е. А. Проектирование мобильного приложения для оптимизации деятельности фитнес-инструктора / Е. А. Салтанаева, С. М. Куценко // Экономика и предпринимательство. – 2025. – № 7(180). – С. 703-708. – DOI 10.34925/EIP.2025.180.7.120. – EDN HDOLII.
4. Бужинская, Н. В. Разработка мобильного приложения для тайм-менеджмента на языке Kotlin / Н. В. Бужинская, С. К. Машенко // Научное обозрение. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 11-15. – DOI 10.17513/srts.1379. – EDN PCPQSS.
5. What Is the AccuWeather RealFeel Temperature? [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.accuweather.com/en/weather-news/what-is-the-accuweather-realfeel-temperature/156655> (дата обращения 10.11.2025).
6. API для использования данных о погоде: Топ лучших [Электронный ресурс]. – URL: <https://otus.ru/journal/api-dlya-ispolzovaniya-dannyh-o-pogode-na-svoih-servisah-top-luchshih/> (дата обращения 10.11.2025).
7. Кузнецов, В. Д. Автоматизация сбора данных для анализа рынка труда на базе API порталов интернет-рекрутмента / В. Д. Кузнецов, Р. М. Хамитов, О. В. Князькина // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 6(167). – С. 1430-1435. – DOI 10.34925/EIP.2024.167.6.298. – EDN CCUUDL.
8. Турсунова, З. Р. Свойства материалов для детской одежды / З. Р. Турсунова, З. Н. Турсунова // Моя профессиональная карьера. – 2022. – Т. 1, № 36. – С. 30-36. – EDN NLVNIU.
9. Коберник, Ю. О. Исследование ассортимента материалов для зимней спортивной одежды / Ю. О. Коберник, В. В. Гетманцева // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 168-176. – DOI 10.24866/VVSU/2073-3984/2022-2/168-176. – EDN QSJMYG.

REFERENCES LIST

1. Khabibrakhmanova, A. I. Tsennost rekomendatelnkh sistem dlia polzovatelei i biznesa / A. I. Khabibrakhmanova // Ekonomika i predprinimatelstvo. – 2024. – № 6(167). – S. 819-822. – DOI 10.34925/EIP.2024.167.6.170. – EDN IJZJHL.
2. Evoliutsiia v sfere razrabotki intellektualnykh sistem i intellektualnye adaptivnye sistemy / G. V. Kovalenko, Iu. Iu. Mihalchevskii [i dr.] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoi aviatsii. – 2023. – № 1(38). – S. 5-18. – EDN OURMNO.
3. Saltanaeva, E. A. Proektirovanie mobilnogo prilozheniia dlia optimizatsii deiatelnosti fitnes-instruktora / E. A. Saltanaeva, S. M. Kutsenko // Ekonomika i predprinimatelstvo. – 2025. – № 7(180). – S. 703-708. – DOI 10.34925/EIP.2025.180.7.120. – EDN HDOLII.
4. Buzhinskaia, N. V. Razrabotka mobilnogo prilozheniia dlia taim-menedzhmenta na iazyke Kotlin / N. V. Buzhinskaia, S. K. Mashchenko // Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 1. – S. 11-15. – DOI 10.17513/srts.1379. – EDN PCPQSS.
5. What Is the AccuWeather RealFeel Temperature? [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.accuweather.com/en/weather-news/what-is-the-accuweather-realfeel-temperature/156655> (data obrashcheniia 10.11.2025).
6. API dlia ispolzovaniia dannykh o pogode: Top luchshikh [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://otus.ru/journal/api-dlya-ispolzovaniya-dannyh-o-pogode-na-svoih-servisah-top-luchshih/> (data obrashcheniia 10.11.2025).

7. Kuznetsov, V. D. Avtomatizatsiia sbora dannykh dlia analiza rynka truda na baze API portalov internet-rekrutmenta / V. D. Kuznetsov, R. M. Khamitov, O. V. Kniazkina // *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. – 2024. – № 6(167). – S. 1430-1435. – DOI 10.34925/EIP.2024.167.6.298. – EDN CCUUDL.
8. Tursunova, Z. R. Svoistva materialov dlia detskoj odezhdy / Z. R. Tursunova, Z. N. Tursunova // *Moia professionalnaia karera*. – 2022. – T. 1, № 36. – S. 30-36. – EDN NLVNIO.
9. Kobernik, Iu. O. Issledovanie assortimenta materialov dlia zimnei sportivnoi odezhdy / Iu. O. Kobernik, V. V. Getmantseva // *Territoriiia novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*. – 2022. – T. 14, № 2. – S. 168-176. – DOI 10.24866/VVSU/2073-3984/2022-2/168-176. – EDN QSJMYG.

Поступила в редакцию 28.11.2025 г., рекомендована к изданию 24.01.2026 г.

INTELLIGENT SYSTEM FOR ADAPTIVE CLOTHING SELECTION BASED ON THE ANALYSIS OF METEOROLOGICAL DATA AND USER PROFILE

Saltanaeva E.A., Kutsenko S.M.

The article is devoted to the development and implementation of a mobile application, which is a personalized recommendation system for adaptive wardrobe selection. The developed application is a practical example of the use of intelligent systems to solve everyday tasks. The urgency of the task is due to the need to take into account many factors that affect human comfort. The solution takes into account not only temperature, but also humidity, wind, precipitation, as well as the user's individual susceptibility to cold. The algorithm analyzes the properties of clothing materials (thermal insulation, moisture resistance, wind protection) and adjusts recommendations based on the results of the user's weather sensitivity test. The application is implemented on Kotlin using Android Studio, OpenWeatherMap API and Firebase. In conclusion, the prospects for the development of the system are presented.

Keywords: recommendation system, mobile application, personalization, Android development.

Салтанаева Елена Андреевна

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,

Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.

E-mail: elena_maister@mail.ru

Saltanaeva Elena Andreevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University,

Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

ORCID: 0000-0002-0430-9748

Куценко Светлана Мунавировна

кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,

Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.

E-mail: s.koutsenko@mail.ru

Kutsenko Svetlana Munavirovna

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University,

Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

ORCID: 0000-0001-7024-798X

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ СЛОЖНОСТИ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ

© 2026 *Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Бражников А.Р.*

В статье рассматривается проблема количественной оценки сложности многомерных нестационарных систем, актуальная для таких областей, как мониторинг финансовых рынков, климатических процессов и технических систем. Проведен анализ существующих подходов – энтропийного, алгоритмического, методов ранних предупреждающих сигналов (EWS) и структурных методов. Выявлены ограничения данных методов в части универсальности и комплексности. Идея предлагаемого подхода направлена на феноменологическое моделирование и выявление устойчивых макроскопических закономерностей сложности на основе применения общесистемных моделей анализа и интерпретации эмпирических данных. Разработаны феноменологические модели описания пространства состояний системы на основе данных и предложены различные интегральные меры сложности. Сформулированы критерии оценки структурной, динамической, системной, описательной и относительной сложности систем. Феноменологический подход позволяет обеспечивать универсальность применения по отношению к многомерным системам различной природы.

Ключевые слова: сложность, многомерные системы, феноменологические модели, информационные меры, критерии сложности, комплексная оценка.

Введение. Проблема количественного описания сложности систем занимает центральное место в современных исследованиях и остаётся предметом активной научной дискуссии [1–3]. На практике многомерные системы различной природы – финансовые рынки, климатические процессы, спутниковый мониторинг, сложные технические комплексы – демонстрируют схожие признаки динамики процессов при приближении к критическим переходам. В частности, перед возникновением существенных аномалий, скачков и критических переходов в состояниях системы наблюдаются рост неопределённости, качественные изменения в распределениях событий и появление нестандартных структур зависимостей между переменными [3–7].

Существующие подходы к оценке сложности лишь частично отражают статику и динамику сложных систем. Энтропийные меры, предложенные К. Шенноном [1], фиксируют степень неопределённости распределений, но не учитывают пространственную структуру связей между компонентами. Алгоритмическая сложность, восходящая к работам А. Н. Колмогорова [8] и Г. Чайтина [9], предоставляет универсальную трактовку информации, однако в прикладном виде остаётся невычислимой на практике. Методы ранних предупреждающих сигналов (EWS), развитые в работах Scheffer и соавт. [4], Lenton [6], Dakos [7], отражают статистические особенности, сопровождающие критические изменения, но их применение сильно зависит от специфики предметной области.

Современные методы количественной оценки сложности систем можно классифицировать по нескольким фундаментальным признакам. Информационно-теоретические методы базируются на концепции неопределённости и включают энтропийные меры Шеннона [1], алгоритмическую сложность Колмогорова [8] и её вычисляемые аппроксимации через сжатие данных [10]. Статистические подходы опираются на анализ временных рядов и включают методы ранних предупреждающих сигналов (Early Warning Signals, EWS) [4], основанные на выявлении критических

замедлений, а также многомерные индикаторы устойчивости [11]. Структурные методы фокусируются на топологии связей между элементами системы и включают сетевой анализ, теорию графов и методы выявления аттракторов [12]. Феноменологические подходы сочетают несколько аспектов сложности через интегральные метрики, учитывающие одновременно распределительные и корреляционные характеристики систем.

Каждая из перечисленных групп методов имеет собственную область эффективного применения и исторически развивалась в рамках различных научных дисциплин. Информационно-теоретические методы получили развитие в теории связи и криптографии, статистические подходы сформировались в экологии и климатологии при анализе критических переходов [6, 7], структурные методы активно используются в анализе социальных и биологических сетей, а феноменологические подходы находят применение в задачах мониторинга и раннего предупреждения аномальных событий в системах различной природы. Вместе с тем, отсутствие единой методологии затрудняет сравнение результатов и выбор оптимального инструментария для конкретных приложений.

Понятие сложности не имеет универсального определения и трактуется различными авторами в зависимости от контекста исследования. В информационной теории сложность связывается с количеством информации, необходимой для описания системы [1, 8], в системном анализе акцент делается на структуре взаимосвязей между элементами [13], а в прикладных областях – технике, экономике, управлении организациями – сложность определяется через метрики, специфичные для данной предметной области. В международном стандарте ISO 22300:2021 сложность трактуется как «характеристика системы, отражающая количество и разнообразие её компонентов, взаимосвязей и взаимозависимостей, которые определяют трудность понимания, моделирования и управления системой». Систематизация существующих трактовок приведена в таблице 1.

Выполненный анализ и структуризация определений из различных областей знания демонстрируют принципиальную необъятность и многомерность понятия «сложность». Причинами этого является необходимость изучения многих видов систем, использование разных методов описания и моделирования в предметных областях, различные цели исследований, которые ставят перед собой авторы, множество представлений о сущности и содержании понятия сложности, многоуровневость и системность этого понятия и т.д.

Таким образом, множественность определений сложности – это отражение природы изучаемого феномена. Сложность – это не столько конкретное свойство, сколько метакатегория, обозначающая класс ситуаций и систем в структурной, динамической и системной форме и имеющая определенную объяснительную модель для конкретной задачи.

Помимо понятия сложности нужно также упомянуть, как именно сложность системы проявляется в различных аспектах её организации. Структурная сложность системы определяется количеством элементов системы, их разнообразием и способом организации. Системы с глубокой иерархией подсистем могут проявлять высокую структурную сложность даже при умеренном общем числе элементов. Реляционная сложность характеризует плотность и характер взаимосвязей между элементами: система с плотной сетью взаимодействий имеет высокую реляционную сложность, что в сетевых системах описывается метриками графов – степенью вершин, коэффициентом кластеризации, длиной характерного пути [4, 6].

Таблица 1. Различные представления о сложности (complexity)

№	Источник	Ключевое определение/идея
1. Системно-инженерный подход:		
1	ГОСТ 59733-2021	Сложность системы определяется как степень разнообразия элементов системы и связей между ними, влияющая на предсказуемость поведения системы и управляемость её функционированием.
2.	ISO/IEC/IEEE 15288:2023	Системная сложность – атрибут системы, определяемый количеством, разнородностью, взаимозависимостью и нелинейностью взаимодействий компонентов, что влияет на управление системой в течение её жизненного цикла.
3.	Дж. Форрестер (1968)	Сложность определяется количеством, разнообразием элементов и обратных связей, порождая контр-интуитивное поведение из-за нелинейностей и запаздываний (эндогенная природа).
2. Кибернетика и теория информации:		
4.	У. Росс Эшби (1956)	Сложность – мера разнообразия (число состояний) системы.
5.	К. Шеннон (1948)	Энтропия как мера неопределенности (информационной сложности) в сообщении, мера сложности данных.
3. Теория систем, синергетика и самоорганизация:		
6.	Л. Бергаланфи (1968)	Два типа: композиционная сложность (число элементов/связей) и организационная сложность (ведущая к эмерджентным свойствам)
7.	И. Пригожин, И. Стенгерс (1984)	Сложность – свойство открытых неравновесных систем, способных к самоорганизации и бифуркациям.
4. Вычислительная и алгоритмическая сложность:		
8.	А.Н. Колмогоров (1965)	Алгоритмическая сложность – минимальная длина программы, воспроизводящей объект (мера внутренней информации/случайности).
9.	М. Гелл-Манн (1995)	Эффективная сложность – длина краткого описания регулярностей (закономерностей) системы при оптимальном уровне округления.
5. Философские и методологические основания:		
10.	Э. Морен (1977–2004)	Сложность – единство разнообразия, порядка и беспорядка, автономии и зависимости.
11.	Уоррен Уивер (1948)	Три типа проблем: простоты, неорганизованной сложности (статистика) и организованной сложности (взаимосвязанные неслучайные элементы).
6. Социальные науки (социология, социопсихика, экономика, сетевой анализ):		
12.	Никлас Луман (1984)	Социальная сложность – избыток возможностей. Редуцируется через бинарные коды и функциональную дифференциацию.
13.	Э. Дюркгейм (1893)	Общественная сложность возникает из роста объёма и плотности общества, ведущего к органической солидарности на основе взаимозависимости.
14.	У. Брайан Артур (1999)	Экономика как сложная адаптивная система (CAS) с постоянно взаимодействующими агентами, порождающими эмерджентные феномены.
15.	С. Галам (2012)	Социопсихическая сложность – моделирование коллективного поведения и формирования общественного мнения как процесса упорядочения в сложной системе взаимодействующих агентов.
7. Когнитивная и психологическая сложность:		
16.	Ж. Пиаже (1947)	Процесс усложнения когнитивных схем через равновесие (ассимиляцию и аккомодацию).
17.	Л.С. Выготский (1934)	Сложность высших психических функций – в их системном строении, социальном происхождении и опосредованном знаками характере.
8. Биологическая и экологическая сложность:		
18.	Э.О. Уилсон (1992)	Биологическая сложность – иерархически организованная структура жизни с эмерджентными свойствами на каждом уровне.
19.	Р.Э. Уланович (1997)	Экологическая сложность – мера, учитывающая разнообразие видов, потоки энергии и степень организации сети (ascendence).
9. Рискология и безопасность:		
20.	Ч. Перроу (1984/1999)	Сложность системы – сложные взаимодействия и жесткая связанность компонентов, порождающая риск «нормальных аварий».
21.	ISO 31000:2018	Сложность – свойство системы, недостаточно понятное из-за множества взаимодействующих элементов, связей, нелинейности или чувствительности.

Динамическая сложность характеризует разнообразие траекторий эволюции системы во времени: системы с хаотическим или квазипериодическим поведением обладают высокой динамической сложностью даже при относительно простой структуре, что связано с концепцией аттракторов и фазовых переходов [5, 12]. На практике различные виды сложности часто коррелируют, но не обязательно совпадают: система может иметь высокую структурную сложность при низкой динамической, или наоборот – простую структуру с хаотической динамикой.

Также необходимо отразить основные задачи оценки сложности системы, одной из которых является прогнозирование критических переходов: финансовые кризисы [3], климатические катастрофы [6, 7], экологические коллапсы [4] и технологические аварии демонстрируют схожие закономерности, когда перед критическим событием система теряет устойчивость, что проявляется в росте сложности её поведения. Следующей задачей, которую решают методы оценки сложности систем, является мониторинг динамики показателей сложности, позволяющий выявлять ранние предупреждающие сигналы и принимать превентивные меры.

Сложность системы непосредственно связана с трудностью её управления: системы с высокой структурной и реляционной сложностью труднее контролировать, поскольку возмущение одного элемента может каскадно распространиться по всей сети связей (ГОСТ 59733-2021, ISO 22300:2021). В инженерии и управлении организациями оценка сложности используется для поиска оптимального баланса между функциональностью и управляемостью системы: излишняя структурная сложность повышает затраты на эксплуатацию и увеличивает вероятность отказов, тогда как чрезмерное упрощение снижает адаптивность и функциональные возможности (ГОСТ 59733-2021).

Исторически развитие теории систем связано с именем К. Шеннона, который заложил основы теории, введя понятие энтропии как меры неопределённости [1]. В дальнейшем А. Н. Колмогоров предложил алгоритмическое определение сложности в 1965 году [8]. Информатик Г. Чайтин развил теорию алгоритмической информации и доказал фундаментальную невычислимость колмогоровской сложности [9]. Математик Б. Мандельброт применил фрактальную геометрию к анализу финансовых рынков [3], показав, что динамика цен характеризуется степенными распределениями и масштабной инвариантностью. Биолог М. Схеффер и его коллеги сформулировали теорию ранних предупреждающих сигналов [4], показав, что перед критическими переходами в экологических, климатических и других системах наблюдаются универсальные статистические аномалии: рост дисперсии, увеличение автокорреляции и критическое замедление. Работы Т. Лентона развили концепцию переломных элементов в климатической системе Земли [6], а В. Дакос систематизировал методы выявления ранних предупреждающих сигналов и подтвердил их применимость к палеоклиматическим данным [7]. Математик Э. Вейнанс провела систематическое сравнение 13-ти многомерных индикаторов устойчивости, показав, что универсального метода, подходящего для всех типов систем, не существует, а выбор оптимального индикатора зависит от характеристик системы и доступных данных [11].

Последние тенденции в исследовании сложности различных систем связаны с интеграцией геометрических и топологических методов анализа пространств состояний систем, феноменологическим моделированием с помощью методов машинного обучения, разработкой междисциплинарных критериев сложности для биологических, социальных, физических систем, исследованием проблем мультимасштабной сложности и т.д. [14–24].

Совокупный вклад работ перечисленных выше исследователей сформировал современное понимание сложности как многоаспектного феномена, требующего интеграции статистических, структурных и динамических подходов. Однако следует отметить, что пока не выработано общесистемного и объективного подхода при оценке сложности систем, что представляет существенный теоретический и практический интерес.

Целью данной работы является разработка системы феноменологических мер оценки сложности, позволяющей обеспечивать универсальность применения по отношению к многомерным системам различной природы.

Информационной основой для построения моделей будут являться массивы данных эмпирической информации, которые характеризуют состояния объектов одного класса и динамику изменения этих состояний во времени.

Феноменологическая модель оценки сложности многомерной системы. Будем рассматривать сложные системы, которые характеризуются многомерными пространствами состояний. В работе речь будет идти о различных мерах оценки сложности систем на основе моделей описания эмпирических данных, характеризующих состояния таких систем. Такой подход согласуется с общесистемными представлениями о сложности и позволяет использовать единый аппарат для систем различной природы. В рамках используемого феноменологического метода [25] сложность системы можно интерпретировать как многомерную характеристику, отражающую разнообразие её состояний, структурную организованность и информационную ёмкость процессов изменения состояний. В этом плане сложность выступает как общесистемное научное понятие, лежащее в основе процессов моделирования и описания системы. При этом понятие сложности будет иметь непосредственное отношение как к состояниям систем, так и процессам изменения их состояний.

Предложим общую формализованную модель сложной системы, которая может быть использована по отношению к системам различной природы и для которых имеются эмпирические данные, представленные в общей структурированной темпоральной форме. Темпоральные данные представляются временными рядами и характеризуют по форме представления любые опытные факты о процессах и явлениях в природе и обществе.

Представляем сложную систему в виде совокупности однородных объектов одного класса. Все объекты такой макросистемы имеют равное число характерных свойств, которые определяются значениями наблюдаемых параметров z_1, z_2, \dots, z_n . Параметры каждого объекта при совершении процессов могут зависеть от времени $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$. В результате наблюдений формируется массив дискретных темпоральных данных, где каждая таблица имеет структуру «объекты – параметры свойств», а множество таблиц упорядочено во времени с заданным шагом [26].

Данной логической модели эмпирических данных поставим в соответствие модель пространства состояний. Рассмотрим n -мерное пространство E^n , где $z=(z_1, z_2, \dots, z_n)$, $z \in E^n$. Будем представлять состояние каждого объекта как совокупность значений его параметров z_1, z_2, \dots, z_n в конкретный момент времени. Величины z_1, z_2, \dots, z_n примем в качестве переменных состояния. Статистическую вероятность состояния объекта определим в виде апостериорной вероятности совместного события наблюдения значений величин z_1, z_2, \dots, z_n в заданный момент времени. Данная вероятность оценивается непосредственным подсчетом апостериорных вероятностей совместных событий [27, 28].

При таком отображении массива эмпирических данных состояния объектов в многомерном пространстве E^n отобразятся точками M этого пространства, а процессы изменения состояний – линиями l этого пространства.

Считаем, что каждому состоянию может быть поставлена в соответствие некая мера, которая однозначно связана с определенным критерием сходства состояний. Для этого введем понятие эмпирической меры θ , которая однозначно характеризует состояния системы и будет являться системным критерием сходства:

$$\theta = k_n \frac{\rho - \rho_0}{\rho_1 - \rho_0}, \quad (1)$$

где ρ – мера сходства состояний в пространстве E^n (геометрическая, статистическая, алгоритмическая), k_n – нормировочный множитель, равный 100, 1000 и т.п.

Назовем данную эмпирическую меру менсурой (от лат. *mensura* – мера). Рассматриваем эту величину как некую скалярную функцию пространства состояний, комплексно отражающую положение каждой точки M в этом пространстве. Менсура θ является относительной величиной, характеризующей меру отклонения состояний объекта от опорных состояний, установленных по соглашению для класса объектов.

Для построения измерительной шкалы менсуры используем метод двух опорных точек. С этой целью в пространстве E^n выбираем два опорных состояния A_0 и A_1 , при этом точке A_0 присваиваем значение $\theta=0$, точке A_1 – например, значение $\theta=100$. Процесс или отрезок A_0A_1 рассматриваем в качестве эталонного. Связь величины θ с переменными z_k будем искать в форме уравнения состояния для всей совокупности объектов в целом:

$$\theta = \theta \left(\frac{z_1}{z_{10}}, \frac{z_2}{z_{20}}, \dots, \frac{z_n}{z_{n0}} \right), \quad (2)$$

где z_{k0} – значения переменных состояния в точке A_0 .

Система измерения величины θ включает в себя объект, метод, шкалу и единицу измерения. Объектом измерения выступает состояние системы, характеризуемое значениями её переменных состояния. Метод измерения заключается в построении измерительной шкалы. Шкала создается методом двух точек: для двух выбранных опорных состояний с использованием меры сходства и соотношения (1) выводится линейное уравнение. Это уравнение, по сути, задаёт прямую линию в многомерном пространстве состояний системы, проходящую через точки опорных состояний. Единицей измерения величины θ служит калиброванная доля отрезка между этими опорными состояниями, длина которого вычисляется в соответствии с заданной метрикой пространства [25–29].

Для количественной оценки сходства процессов изменения состояний (или меры удалённости состояний) введем величину, которую определим как количество информации. Этот показатель характеризует информационную близость или различимость траекторий в пространстве состояний и формализуется с помощью метрического критерия, заданного на множестве процессов. Метрика расстояния между двумя произвольными состояниями определяется вдоль линии, соединяющей соответствующие точки в пространстве E^n .

В классическом понимании мера информации представляет собой непрерывную аддитивную функцию, определённую на множестве событий. Поэтому количество информации представим в виде неотрицательной скалярной функции, которая

приписывает численное значение последовательности однородных событий, описывающих реальный процесс. Эта функция непосредственно связана с моделью пространства состояний сложной системы. С учетом этого количество информации предлагается определять в виде криволинейного интеграла:

$$\Delta I_l = \frac{1}{\delta} \int_l \theta_l(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

где ε – метрический параметр, характеризующий процесс l , δ – нормировочная единица измерения; $\theta_l(\varepsilon)$ – функция менсуры, заданная на линии l и связанная с мерой сходства.

В рамках предлагаемого феноменологического подхода количество информации трактуется не как мера «снятой неопределённости» (по Шеннону), а как мера изменчивости состояний системы в пространстве её параметров. Геометрически dI (или ΔI) интерпретируется как функция процесса, т.е. линии, соединяющей два произвольных состояния M в пространстве E^n . Аддитивность обеспечивается свойствами криволинейного интеграла (3), а связь с наблюдаемыми событиями выражается через функцию θ .

Система измерения количества информации включает в себя объект, метод и единицу измерения. Объектом измерения является траектория процесса изменения состояний в многомерном пространстве E^n . Метод измерения заключается в сравнении измеряемого процесса с эталонным, в качестве которого используется прямая линия, соединяющая два фиксированных опорных состояния A_0 и A_1 . Единица измерения представляет собой калиброванный отрезок эталонной траектории, соответствующий изменению эмпирической меры θ на одну стандартизованную единицу вблизи состояния A_0 . Эта величина служит нормировочным коэффициентом δ в определении (3). Такая система обеспечивает однозначность и сопоставимость измерений количества информации для различных процессов в рамках единого пространства состояний.

Для построения моделей сложных систем на основе эмпирических данных сформулируем следующие гипотезы:

Гипотеза 1. Эмпирические данные о состояниях объектов могут быть представлены в виде точек в континуальном многомерном пространстве E^n , где координатные оси соответствуют наблюдаемым параметрам z_1, z_2, \dots, z_n , принимаемым в качестве переменных состояния. Дискретные данные рассматриваются как конечная выборка из этого непрерывного пространства. Существует скалярное поле величины $\theta(M)$, описываемое функцией состояния $\theta = \theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$, которая может быть восстановлена на основе эмпирических зависимостей, таких как уравнение состояния вида (2).

Гипотеза 2. Каждому состоянию объекта в пространстве E^n может быть сопоставлено значение менсуры θ , а каждой линии l , соединяющей два произвольных состояния, – количество информации ΔI_l согласно (3). Величины θ , ΔI_l и переменные состояния z_1, z_2, \dots, z_n в совокупности однозначно определяют положение объекта в пространстве состояний. Для любого элементарного отрезка линии l выполняется соотношение:

$$dI_l = c_l d\theta, \quad (4)$$

где c_l – коэффициент, зависящий от процесса l и, в общем случае, от параметров состояния.

Гипотеза 3. Предполагается, что для наблюдаемых состояний справедлив принцип инвариантности: дискретные состояния M_i образуют многомерный граф. Геометрическая структура графа сохраняется при изометрических преобразованиях пространства E^n , оставляющих неизменными расстояния между точками, измеренные в соответствии с введённой метрикой. Этот граф, вместе со скалярным полем θ и набором мер ΔI_i , отражает феноменологические закономерности пространства состояний и характеризует стабильность метрических соотношений. Форма многомерного графа может меняться с течением времени в пространстве E^n , в связи с совершением объектами процессов изменения своих состояний. Каждому i -тому объекту соответствует своя линия (траектория) процесса l_i изменения состояния.

Гипотеза 4. Для пространства состояний E^n существуют потенциалы – функции состояния, количественно описывающие закономерности пространства и характеризующие поле состояний в целом. Эти потенциалы могут служить для построения интегральных моделей системы и оценки ее сложности.

Поставим задачу определить меры количества информации, свойственные пространству состояний E^n , используя связь вида (2) и представление вида (3), а также эмпирические закономерности взаимосвязи величин θ и ΔI_i .

Декларируется, что в пространстве состояний E^n существует скалярное поле величины $\theta(M)$. Пусть для описания данного поля определена функция точки $\theta(M) = \theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$. Сформируем векторное поле от функции $\theta(M)$ вида $\mathbf{A} = \text{grad } \theta(M)$, где $A_1 = \partial\theta/\partial z_1$; $A_2 = \partial\theta/\partial z_2, \dots, A_n = \partial\theta/\partial z_n$ и образуем дифференциальную форму Пфаффа:

$$dI = c_1 A_1 dz_1 + c_2 A_2 dz_2 + \dots + c_n A_n dz_n; \quad \frac{\partial I}{\partial z_k} = c_k \frac{\partial \theta}{\partial z_k}, \quad (5)$$

где c_k – константы. Соотношение (5) предполагает для процесса l связь вида $dI = c_l d\theta$ [27].

Будем считать, что для произвольного процесса l в окрестности точки M величина dI определяет изменение некоего количества информации, измеренного заданным образом. Это следует из того, что любой криволинейный интеграл первого типа вида (3) может быть сведен к криволинейному интегралу второго типа, который образуется путем интегрирования дифференциальной формы Пфаффа вида (5).

Найдем условие, при котором форма Пфаффа (5) может быть преобразована в полный дифференциал. В этом случае должен существовать интегрирующий множитель μ когда:

$$\mu dI = \mu(c_1 A_1 dz_1 + c_2 A_2 dz_2 + \dots + c_n A_n dz_n) = ds, \quad (6)$$

где $\mu(M)$ – некоторая функция точки, ds – полный дифференциал.

Покажем, что вид функции $\theta(M) = \theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$ может определять существование интегрирующего множителя μ . Пусть $\theta(M)$ представлена произведением функций вида $\theta(M) = \varphi_1(z_1)\varphi_2(z_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(z_n)$, тогда интегрирующим множителем уравнения (6) будет функция $\mu = 1/\theta$. С учетом соотношения (5) получим:

$$ds = \frac{dI}{\theta} = \frac{1}{\varphi_1(z_1) \cdot \dots \cdot \varphi_n(z_n)} \left[c_1 \varphi_1'(z_1) \cdot \dots \cdot \varphi_n(z_n) dz_1 + \dots + c_n \varphi_1(z_1) \cdot \dots \cdot \varphi_n'(z_n) dz_n \right].$$

После сокращений из данного соотношения имеем:

$$ds = \frac{dI}{\theta} = c_1 \frac{\varphi_1'(z_1)}{\varphi_1(z_1)} dz_1 + c_2 \frac{\varphi_2'(z_2)}{\varphi_2(z_2)} dz_2 + \dots + c_n \frac{\varphi_n'(z_n)}{\varphi_n(z_n)} dz_n, \quad (7)$$

или

$$s - s_0 = c_1 \ln \left(\frac{\varphi_1(z_1)}{\varphi_1(z_{10})} \right) + c_2 \ln \left(\frac{\varphi_2(z_2)}{\varphi_2(z_{20})} \right) + \dots + c_n \ln \left(\frac{\varphi_n(z_n)}{\varphi_n(z_{n0})} \right), \quad (8)$$

где s_0 – принятое значение величины s в опорном состоянии.

Величину вида (7, 8) при $\varphi_k(z_k) = z_k$ в термодинамике исторически называют энтропией состояния системы. В данной работе, исходя из того, что феноменологическая модель формируется исключительно на структурированных темпоральных данных, определим величину s как эмпирическую энтропию.

Из приведенного выше вытекает, что энтропия есть общий интеграл уравнения (5) при определенном виде функции точки $\theta(M) = \theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$. Для того, чтобы в рамках дифференциальной геометрии раскрыть геометрический смысл энтропии составим дифференциальное уравнение, характеризующее пространство состояний. Данное уравнение будет связано с дифференциальной формой Пфаффа (5), которая задает величину dI при изменении состояния в окрестности любой точки M .

При представлении $\theta(M)$ мультипликативной функцией справедливо свойство

$$\frac{\partial \theta}{\partial z_k} = \frac{\theta}{\varphi_k(z_k)} \varphi_k'(z_k) \quad \text{или с учетом (5)} \quad \frac{\varphi_k(z_k)}{c_k \varphi_k'(z_k)} \frac{\partial I}{\partial z_k} = \theta.$$

Суммируя последние соотношения по всем k , получим линейное неоднородное уравнение в частных производных первого порядка:

$$\frac{\varphi_1(z_1)}{c_1 \varphi_1'(z_1)} \left(\frac{\partial I}{\partial z_1} \right) + \frac{\varphi_2(z_2)}{c_2 \varphi_2'(z_2)} \left(\frac{\partial I}{\partial z_2} \right) + \dots + \frac{\varphi_n(z_n)}{c_n \varphi_n'(z_n)} \left(\frac{\partial I}{\partial z_n} \right) = n \theta. \quad (9)$$

Решая уравнение (9) методом характеристик, будем иметь:

$$ds = c_1 n \frac{\varphi_1'(z_1)}{\varphi_1(z_1)} dz_1 = c_2 n \frac{\varphi_2'(z_2)}{\varphi_2(z_2)} dz_2 = \dots = c_n n \frac{\varphi_n'(z_n)}{\varphi_n(z_n)} dz_n = \frac{dI}{\theta}. \quad (10)$$

Если сложить все слагаемые уравнения (10), то получим в точности уравнение (7). Таким образом, согласно (10) энтропия является параметром характеристических кривых пространства состояний E^n [27]. При этом уравнение (7) определяет многомерную поверхность, а уравнения (10) характеризуют семейство кривых, лежащих на интегральной поверхности. Исходя из этого, линии энтропии можно представить как естественные криволинейные координаты пространства состояний. В свою очередь, может существовать семейство поверхностей, ортогональных этим характеристическим кривым, которое находится из скалярного произведения вектора:

$$\mathbf{F} = \frac{\varphi_1(z_1)}{c_1 \varphi_1'(z_1)} \mathbf{e}_1 + \frac{\varphi_2(z_2)}{c_2 \varphi_2'(z_2)} \mathbf{e}_2 + \dots + \frac{\varphi_n(z_n)}{c_n \varphi_n'(z_n)} \mathbf{e}_n, \quad (11)$$

и единичного вектора $\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 dz_1 + \mathbf{e}_2 dz_2 + \dots + \mathbf{e}_n dz_n$, а именно $(\mathbf{F} \cdot \mathbf{e}) = 0$ [27]. Из данного условия получаем многомерное уравнение Пфаффа вида:

$$\frac{\varphi_1(z_1)}{c_1 \varphi_1'(z_1)} dz_1 + \frac{\varphi_2(z_2)}{c_2 \varphi_2'(z_2)} dz_2 + \dots + \frac{\varphi_n(z_n)}{c_n \varphi_n'(z_n)} dz_n = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) приводит к полному дифференциалу $P(z_1, z_2, \dots, z_n) = C$, поэтому можно считать, что существует потенциал пространства E^n в виде семейства поверхностей, ортогональных характеристикам (10). Потенциал также представляется в виде системы естественных криволинейных координат пространства состояний.

Из выполненных теоретических обоснований можно сделать следующие выводы. Если для класса объектов существует уравнение состояния вида (2), то можно считать, что в пространстве E^n есть скалярное поле некоторой величины $\theta = \theta(M)$. Если это поле будет описано мультипликативной функцией, то существует характеристическая функция пространства состояний, которая является криволинейной координатой данного пространства и называется энтропией s . В этом же пространстве может существовать характеристическая функция в виде поверхности уровня, ортогональной линиям энтропии, которую естественно назвать потенциалом P данного пространства.

Решение задачи построения предложенной феноменологической модели связано с обработкой и анализом эмпирических данных [27, 28].

Представления о сложности многомерной системы в рамках феноменологического подхода. В контексте предложенного подхода, основанного на построении модели многомерного пространства состояний и введённых мерах (менсура θ , количество информации ΔI , энтропия s , потенциал P), сложность системы может быть интерпретирована через несколько взаимосвязанных аспектов:

1. Структурная сложность как мера разнообразия состояний. В пространстве состояний E^n сложность системы может характеризоваться размерностью и геометрией облака точек, соответствующих наблюдаемым состояниям. При этом менсура θ отражает положение точки в пространстве. Вариация θ по множеству состояний (дисперсия, диапазон) может служить индикатором разнообразия для класса объектов. В свою очередь, энтропия s , введённая как характеристическая функция пространства, может быть использована по аналогии с энтропией Шеннона для оценки неопределённости состояния макросистемы. Большие значения энтропии могут соответствовать большему разнообразию (сложности) в распределении состояний.

Сложность континуального пространства состояний может оцениваться по критерию размерности – числу значимых переменных n , определяющих пространство E^n . Чем больше число n , тем больше степеней свободы и потенциально выше сложность.

Если исходить из анализа поля состояний, то критерием сложности может быть вариабельность или градиент менсуры в пространстве состояний. Система, в которой величина θ сильно меняется от точки к точке, считается более сложной. Измерение такого критерия проводится по дисперсии значений θ по всему множеству состояний или по средней величине градиента величины $|\nabla\theta|$. При этом учитывается форма и сложность функции $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$. Исходя из принципа соответственных состояний [30], если система подчиняется единому уравнению состояния, то её сложность может считаться управляемой и структурированной. Измеряемым критерием в этом случае является точность, с которой уравнение состояний описывает эмпирические данные. Аналогичным образом, комплексной оценкой сложности могут выступать значения энтропии и потенциала состояний.

2. Динамическая сложность как мера информационной ёмкости процессов. Сложность системы может характеризоваться динамическими параметрами, которые

соответствуют наблюдаемым процессам. Количество информации ΔI , определённое как интеграл вдоль траектории процесса, отражает суммарное изменение состояния системы вдоль этого процесса. Длина траектории в пространстве состояний (геометрическая мера) и накопленное количество информации могут служить мерами сложности поведения системы: более извилистые или длинные траектории процессов, требующие больше информации для описания, соответствуют более сложной динамике. Поэтому информационными критериями оценки всего спектра процессов в пространстве E^n могут выступать среднее значение ΔI по всем рассматриваемым процессам или максимальное значение ΔI для наиболее длинной траектории. В свою очередь, в качестве оценок динамической сложности могут выступать изменения энтропии ΔS и потенциала ΔP при совершении процессов.

Геометрическими критериями сложности процессов могут также быть отклонения реальных траекторий от простейших (например, прямых линий), дифференциальные характеристики кривых (кривизна, извилистость) и т.д. Измеряемыми параметрами могут являться средняя кривизна по всему спектру траекторий, отношение длины траектории к расстоянию между её концевыми точками (коэффициент извилистости) и т.д.

Комплексная оценка сложности всего класса объектов может быть связана с анализом структурной сложности графа состояний, который динамически изменяется во времени. Критерием будет выступать связность и топология графа, построенного на точках состояний M_i в определенный момент времени, наличие кластеров, иерархий, сложных паттернов связей и т.д. Измеряемыми величинами в этом случае будут такие показатели, как кластерный коэффициент, средняя длина пути, число связей на узел, модулярность, а также другие показатели оценки динамической сложности графов как функций времени: расстояния между последовательно идущими графами, матрицы смежности и т.д.

3. Системная сложность как мера взаимозависимости переменных. В многомерном пространстве состояний сложность системы может проявляться во взаимодействиях между переменными состояниями. Сравнение предложенных феноменологических мер (менсура, эмпирическая энтропия, потенциал) с классическими информационными мерами (совместная энтропия, взаимная информация, мультиинформация, информация о взаимодействии) позволяет оценить, насколько система отклоняется от простых аддитивных моделей. При этом информационные меры позволяют количественно оценивать синергетические и избыточные взаимодействия между несколькими переменными. Высокая синергия (отрицательная информация о взаимодействии) может указывать на сложные нелинейные взаимозависимости.

4. Описательная сложность как мера трудности моделирования. Сложность системы может быть связана с трудностью построения адекватной модели. Это может отражаться в виде функции $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$: чем сложнее зависимость (например, нелинейная, с большим числом параметров), тем сложнее система.

Введение нескольких потенциалов (функций состояния) и энтропии позволяет описать систему на разных уровнях обобщения. Наличие нескольких взаимосвязанных обобщенных характеристик (θ, s, P) может само по себе рассматриваться как признак сложной системы, требующей многомерного описания.

Особым критерием сложности является требуемый объём данных для моделирования, например, минимальный объём эмпирических данных, необходимый для построения адекватной модели. Известно, что более сложные системы требуют больше данных для достижения той же точности моделирования.

5. Относительная сложность как мера общесистемного сравнения. Множество состояний объектов одного класса в определенный момент времени может характеризоваться оценкой значений параметров каждого наблюдаемого объекта по отношению к аналогичным величинам, наблюдаемым у объекта, который условно принят за опорный объект. Аналогичным образом изменчивость состояний может характеризоваться оценкой процессов объектов по отношению к эталонному процессу опорного объекта. Введённая система измерения количества информации основана на сравнении с эталонным процессом (прямой линией между опорными состояниями). Поэтому параметры отклонения реальных траекторий от эталонных на локальном или системном уровнях могут также служить мерой сложности процессов. Например, коэффициент c_l в уравнении (4), который характеризует линию процесса изменения состояния объекта, может содержать информацию о локальной сложности изменений.

Относительная оценка сложности класса однородных объектов должна даваться на основе характеристик всех объектов путем сравнения их с аналогичными характеристиками некоторого простого класса объектов, принятого за эталонный. В качестве эталонного класса может быть принят простой класс объектов, когда в процессах изменения значений параметров формируются независимые и равновероятные состояния. В качестве критериев сложности могут использоваться интегральные меры сходства состояний, процессов или классов или критерии сравнения статистических распределений, найденных для каждой из двух групп объектов.

С этой целью формируются две однородные группы объектов, одинаковые по числу экземпляров и изучаемых переменных состояния. Первая группа формируется из экземпляров изучаемого класса реальных объектов, вторая – из аналогичных модельных объектов, имеющих равновероятные состояния. Оценка сложности проводится путем сравнения эмпирических распределений событий или их характеристических величин [27].

В рамках предложенного феноменологического подхода критерии сложности системы могут быть основаны на комбинации введённых мер и характеристик. Такими критериями могут быть:

- интегральная информационная ёмкость $C_l = \frac{1}{L_{общ}} \int_{\Gamma} \theta(\varepsilon) d\varepsilon$, где интеграл

берётся по всем траекториям системы, нормированный на общую длину процессов. Чем больше информации аккумулирует макросистема при изменениях состояний, тем она сложнее;

- информационная плотность состояний $\rho_l = dI/dV_n$, где dV_n – элементарный объём в пространстве E^n . Критерий показывает, сколько информации приходится на единицу объёма пространства состояний;

- средняя кривизна траекторий $K_l = \frac{1}{N_l} \sum_l \frac{1}{L_l} \int_{\Gamma} |k(\varepsilon)| d\varepsilon$, где $k(\varepsilon)$ – кривизна

траектории. Сложные системы демонстрируют более извилистые, нелинейные траектории;

- степень связности графа состояний $\lambda_{\Gamma} = 2m/[I(I-1)]$, где m – число рёбер (значимых связей между состояниями), I – число вершин. Плотно связанные графы соответствуют более интегрированным (и потенциально сложным) системам.

- значения энтропии и потенциала состояний, а также их изменения и интегральные оценки по отношению к модельным состояниям/процессам или особым (аномальным) характеристикам системы;

- степень относительной сложности состояний/классов объектов на основе сравнения эмпирических распределений в координатах логарифм/пробит вероятности – эмпирическая энтропия для групп реальных и модельных объектов.

Таким образом, при феноменологическом подходе сложность, чаще всего, это не абсолютная величина, а относительная мера, зависящая от описания пространства состояний, принятой системы измерения величин, критериев сходства и используемых эталонных моделей.

Краткое описание необходимых экспериментальных исследований. Для апробации предложенного подхода необходимо выполнить обработку эмпирических данных и построение моделей пространств состояний систем различных видов – физических, технических, биологических, экономических и социальных. На основе полученных моделей следует сформировать различные критерии сложности и провести вычислительные расчеты по их определению. Типовой многомерный массив данных для систем определенной природы должен включать в себя несколько сотен объектов при учете от двух до десяти переменных состояния. Чтобы можно было сделать междисциплинарные статистические выводы необходимо иметь данные для 40–50 сложных систем, которые относятся к 4–5 видам. Для каждого массива расчетным путем необходимо определить от 5 до 10 предложенных критериев сложности. Полученный количественный материал будет являться основой для проверки адекватности и универсальности критериев, установления их корреляционных связей и статистической значимости, предметной интерпретации различных видов сложности, а также для системного анализа проблемы сложности применительно к разным областям. Все это позволит сформулировать общесистемные представления о сложности по отношению к реальным системам.

Выводы. Проведенный анализ современных подходов к оценке сложности систем (энтропийного, алгоритмического, методов ранних предупреждающих сигналов и структурных методов) показал их ограниченную универсальность при работе с реальными многомерными нестационарными данными. Каждый из этих методов акцентирует лишь отдельные аспекты сложности – статистические, информационные или динамические – и не обеспечивает комплексного учета изменений в распределениях и структуре взаимосвязей, предшествующих критическим переходам.

Для преодоления этих ограничений предложен феноменологический подход, основанный на построении модели многомерного пространства состояний системы и введении системы интегральных мер: менсуры (θ), количества информации (ΔI), энтропии (s) и потенциала (P). Данный подход позволяет количественно оценивать отклонение текущего состояния конкретного объекта от состояний всей совокупности объектов в целом, объединяя анализ как распределительных, так и структурно-корреляционных характеристик. Ключевыми преимуществами предложенного метода являются:

- универсальность – применимость к системам различной природы (финансовым, климатическим, техническим и т.д.) благодаря использованию общей модели пространства состояний;

- комплексность оценки – одновременный учёт структурной, динамической и системной, описательной и относительной сложности через набор взаимосвязанных метрик и критериев;

- ранняя диагностика – возможность выявления начальных состояний критических переходов за счёт отслеживания изменений информационной меры и энтропии;

- адаптивность – возможность настройки опорных состояний, эталонных процессов и метрик под специфику объекта мониторинга на основе эмпирических данных.

Перспективы развития подхода связаны с внедрением адаптивных алгоритмов выбора опорных состояний, повышением вычислительной эффективности для работы с большими данными, а также дальнейшей экспериментальной верификацией на реальных многомерных временных рядах и массивах данных. Предложенный феноменологический метод открывает возможности для создания единого методологического базиса оценки сложности в задачах мониторинга, прогнозирования и управления многомерными системами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423.
2. Zurek, W. H. Complexity, entropy and the physics of information / W. H. Zurek // Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. – 1990. – Vol. VIII. – 548 p.
3. Mandelbrot, B. B. The (Mis) Behavior of Markets: A Fractal View of Risk, Ruin and Reward / B. B. Mandelbrot, R. L. Hudson. – New York: Basic Books, 2006. – 348 p. – ISBN 1-86-197790-5.
4. Early-warning signals for critical transitions / M. Scheffer, V. Dakos, E. H. Van Nes [et al.] // Nature. – 2009. – Vol. 461, No. 7260. – P. 53–59. – DOI 10.1038/nature08227. – EDN MYNNPR.
5. Stanley, H. E. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena / H. E. Stanley. – New York: Oxford University Press, 1987. – 308 p.
6. Lenton, T. M. Tipping elements in the Earth's climate system / T. M. Lenton, H. Held, E. Kriegler // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2008. – Vol. 105, No. 6. – P. 1786–1793. – DOI 10.1073/pnas.0705414105.
7. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change / V. Dakos, M. Scheffer, E. H. Van Nes [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2008. – Vol. 105, No. 38. – P. 14308–14312. – DOI 10.1073/pnas.0802430105.
8. Колмогоров, А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» / А. Н. Колмогоров // Проблемы передачи информации. – 1965. – Т. 1, № 1. – С. 3–11.
9. Chaitin, G. J. Information-Theoretic Limitations of Formal Systems / G. J. Chaitin // Journal of the ACM. – 1974. – Vol. 21, No. 3. – P. 403–424. – DOI 10.1145/321832.321839. – EDN XQKTSP.
10. Cilibrasi, R. Clustering by compression / R. Cilibrasi, P. M. Vitanyi // IEEE Transactions on Information Theory. – 2005. – Vol. 51, No. 4. – P. 1523–1545.
11. Evaluating the performance of multivariate indicators of resilience loss / E. Weinans, E. H. Van Nes, I. A. V. D. Leemput, R. Quax // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – DOI 10.1038/s41598-021-87839-y.
12. Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980: proceedings of a symposium held at the University of Warwick 1979/80. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 366–381.
13. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate / P. D. L. Ritchie, J. J. Clarke, P. M. Cox, C. Huntingford // Nature. – 2021. – Vol. 592, No. 7855. – P. 517–523. – DOI 10.1038/s41586-021-03263-2. – EDN JPEJBO.
14. Prokopenko, M. An information-theoretic primer on complexity, self-organization, and emergence / M. Prokopenko, F. Boschetti, A. J. Ryan // Complexity. – 2009. – Vol. 15, No. 1. – P. 11–28. – DOI 10.1002/cplx.20249.
15. Gell-Mann, M. Information measures, effective complexity, and total information / M. Gell-Mann, S. Lloyd // Complexity. – 1996. – Vol. 2, No. 1. – P. 44–52. – DOI 10.1002/(sici)1099-0526(199609/10)2:1.
16. Crutchfield, J. P. The calculi of emergence: computation, dynamics and induction / J. P. Crutchfield // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1994. – Vol. 75, No. 1–3. – P. 11–54.
17. Lopez-Ruiz, R. A statistical measure of complexity / R. Lopez-Ruiz, H. L. Mancini, X. Calbet // Physics Letters A. – 1995. – Vol. 209, No. 5–6. – P. 321–326. – EDN APMKJN.

18. Varley, T. F. Information theory for complex systems scientists: What, why, and how / T. F. Varley // *Physics Reports*. – 2025. – Vol. 1148. – P. 1–55. – DOI 10.1016/j.physrep.2025.09.007. – EDN TVWMZD.
19. Reducibility of higher-order networks from dynamics / M. Lucas [et al.] // *Nature Communications*. – 2026. – arXiv 2404.08547v4.
20. Multidimensional resilience decision-making for complex and substructured systems / J. Salomon, J. Behrendorf, N. Winnewisser [et al.] // *Resilient Cities and Structures*. – 2023. – Vol. 1, No. 3. – P. 61–78. – DOI 10.1016/j.rcns.2022.10.005.
21. Boi, L. Geometry and phenomenology of the living: Limits and possibilities of mathematization, complexity and individuation in biological sciences / L. Boi, C. Lobo // *Theory in Biosciences*. – 2022. – Vol. 141, No. 2. – P. 53–58. – DOI 10.1007/s12064-022-00365-x.
22. Qazi, A. Data-driven impact assessment of multidimensional project complexity on project performance / A. Qazi // *International Journal of Productivity and Performance Management*. – 2022. – Vol. 71, No.1. – P. 58–78. – DOI 10.1108/IJPPM-06-2020-0281.
23. The Emergence of Complex Behavior in Large-Scale Ecological Environments / J. Bejjani, C. Van Amburg, C. Wang [et al.] // *arXiv preprint*. – 2025. – arXiv: 2510.18221.
24. Vakulenko, S. A. Noisy deep networks: chaos, multistationarity, and eternal evolution / S. A. Vakulenko, I. Sudakow // *Journal of Physics: Complexity*. – 2025. – Vol. 6, No. 2. – P. 025008. – DOI 10.1088/2632-072X/adcdb4.
25. Аверин, Г. В. О проблеме измеримости состояний сложных систем / Г. В. Аверин, А. В. Звягинцева, А. А. Швецова // *Мягкие измерения и вычисления*. – 2020. – Т. 37, № 12. – С. 18–30. – DOI 10.36871/2618-9976.2020.12.002. – EDN DMWNHC.
26. Measurement of the Status of Complex Systems in Multidimensional Phase Spaces / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva, I. S. Konstantinov, A. A. Shvetsova // *An International Journal of Advanced Computer Technology*. – 2019. – Vol. 8, No. 6. – P. 3176–3181. – EDN VFHTCW.
27. Аверин, Г. В. Системодинамика: теория и приложения / Г. В. Аверин. – Донецк: ООО «НПП «Фолиант», 2022. – 535 с. – ISBN 978-5-6047945-0-0. – EDN LJDBFI.
28. Звягинцева, А. В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / А. В. Звягинцева. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2016. – 257 с. – ISBN 978-5-4442-0120-6. – EDN AXBXXZ.
29. Method and criteria for assessing sustainable development / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva, I. S. Konstantinov, A. A. Shvetsova // *The Journal of Social Sciences Research*. – 2018, No. Special Issue 5. – P. 181–187. – DOI 10.32861/jssr.spi5.181.187. – EDN CRQEYU.
30. Аверин, Г. В. О справедливости принципа соответственных состояний для систем различной природы / Г. В. Аверин, А. В. Звягинцева // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2017. – № 16(265). – С. 104–112. – EDN ZGZCJR.

REFERENCES LIST

1. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // *Bell System Technical Journal*. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423.
2. Zurek, W. H. Complexity, entropy and the physics of information / W. H. Zurek // *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*. – 1990. – Vol. VIII. – 548 p.
3. Mandelbrot, B. B. *The (Mis) Behavior of Markets: A Fractal View of Risk, Ruin and Reward* / B. B. Mandelbrot, R. L. Hudson. – New York: Basic Books, 2006. – 348 p. – ISBN 1-86-197790-5.
4. Early-warning signals for critical transitions / M. Scheffer, V. Dakos, E. H. Van Nes [et al.] // *Nature*. – 2009. – Vol. 461, No. 7260. – P. 53–59. – DOI 10.1038/nature08227. – EDN MYNNPR.
5. Stanley, H. E. *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena* / H. E. Stanley. – New York: Oxford University Press, 1987. – 308 p.
6. Lenton, T. M. Tipping elements in the Earth's climate system / T. M. Lenton, H. Held, E. Kriegler // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2008. – Vol. 105, No. 6. – P. 1786–1793. – DOI 10.1073/pnas.0705414105.
7. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change / V. Dakos, M. Scheffer, E. H. Van Nes [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2008. – Vol. 105, No. 38. – P. 14308–14312. – DOI 10.1073/pnas.0802430105.
8. Kolmogorov, A. N. Tri podkhoda k opredeleniiu poniatia «kolichество informatsii» / A. N. Kolmogorov // *Problemy peredachi informatsii*. – 1965. – Т. 1, № 1. – С. 3–11.
9. Chaitin, G. J. Information-Theoretic Limitations of Formal Systems / G. J. Chaitin // *Journal of the ACM*. – 1974. – Vol. 21, No. 3. – P. 403–424. – DOI 10.1145/321832.321839. – EDN XQKTSP.

10. Cilibrasi, R. Clustering by compression / R. Cilibrasi, P. M. Vitanyi // IEEE Transactions on Information Theory. – 2005. – Vol. 51, No. 4. – P. 1523–1545.
11. Evaluating the performance of multivariate indicators of resilience loss / E. Weinans, E. H. Van Nes, I. A. V. D. Leemput, R. Quax // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – DOI 10.1038/s41598-021-87839-y.
12. Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980: proceedings of a symposium held at the University of Warwick 1979/80. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 366–381.
13. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate / P. D. L. Ritchie, J. J. Clarke, P. M. Cox, C. Huntingford // Nature. – 2021. – Vol. 592, No. 7855. – P. 517–523. – DOI 10.1038/s41586-021-03263-2. – EDN JPEJBO.
14. Prokopenko, M. An information-theoretic primer on complexity, self-organization, and emergence / M. Prokopenko, F. Boschetti, A. J. Ryan // Complexity. – 2009. – Vol. 15, No. 1. – P. 11–28. – DOI 10.1002/cplx.20249.
15. Gell-Mann, M. Information measures, effective complexity, and total information / M. Gell-Mann, S. Lloyd // Complexity. – 1996. – Vol. 2, No. 1. – P. 44–52. – DOI 10.1002/(sici)1099-0526(199609/10)2:1.
16. Crutchfield, J. P. The calculi of emergence: computation, dynamics and induction / J. P. Crutchfield // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1994. – Vol. 75, No. 1–3. – P. 11–54.
17. Lopez-Ruiz, R. A statistical measure of complexity / R. Lopez-Ruiz, H. L. Mancini, X. Calbet // Physics Letters A. – 1995. – Vol. 209, No. 5–6. – P. 321–326. – EDN APMKJN.
18. Varley, T. F. Information theory for complex systems scientists: What, why, and how / T. F. Varley // Physics Reports. – 2025. – Vol. 1148. – P. 1–55. – DOI 10.1016/j.physrep.2025.09.007. – EDN TVWMZD.
19. Reducibility of higher-order networks from dynamics / M. Lucas [et al.] // Nature Communications. – 2026. – arXiv 2404.08547v4.
20. Multidimensional resilience decision-making for complex and substructured systems / J. Salomon, J. Behrendorf, N. Winnewisser [et al.] // Resilient Cities and Structures. – 2023. – Vol. 1, No. 3. – P. 61–78. – DOI 10.1016/j.rcns.2022.10.005.
21. Boi, L. Geometry and phenomenology of the living: Limits and possibilities of mathematization, complexity and individuation in biological sciences / L. Boi, C. Lobo // Theory in Biosciences. – 2022. – Vol. 141, No. 2. – P. 53–58. – DOI 10.1007/s12064-022-00365-x.
22. Qazi, A. Data-driven impact assessment of multidimensional project complexity on project performance / A. Qazi // International Journal of Productivity and Performance Management. – 2022. – Vol. 71, No.1. – P. 58–78. – DOI 10.1108/IJPPM-06-2020-0281.
23. The Emergence of Complex Behavior in Large-Scale Ecological Environments / J. Bejjani, C. Van Amburg, C. Wang [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv: 2510.18221.
24. Vakulenko, S. A. Noisy deep networks: chaos, multistationarity, and eternal evolution / S. A. Vakulenko, I. Sudakow // Journal of Physics: Complexity. – 2025. – Vol. 6, No. 2. – P. 025008. – DOI 10.1088/2632-072X/adcd4..
25. Averin, G. V. O probleme izmerimosti sostoianii slozhnykh sistem / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva, A. A. Shvetsova // Miagkie izmereniia i vychisleniia. – 2020. – T. 37, № 12. – S. 18–30. – DOI 10.36871/ 2618-9976.2020.12.002. – EDN DMWNHC.
26. Measurement of the Status of Complex Systems in Multidimensional Phase Spaces / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva, I. S. Konstantinov, A. A. Shvetsova // An International Journal of Advanced Computer Technology. – 2019. – Vol. 8, No. 6. – P. 3176–3181. – EDN VFHTCW.
27. Averin, G. V. Sistemodinamika: teoriia i prilozheniia / G. V. Averin. – Donetsk: OOO «NPP «Foliant», 2022. – 535 s. – ISBN 978-5-6047945-0-0. – EDN LJDBFI.
28. Zviagintseva, A. V. Veroiatnostnye metody kompleksnoi otsenki prirodno-antropogennykh sistem / A. V. Zviagintseva. – Moskva: Izdatelskii dom «Spektr», 2016. – 257 s. – ISBN 978-5-4442-0120-6. – EDN AXBXXZ.
29. Method and criteria for assessing sustainable development / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva, I. S. Konstantinov, A. A. Shvetsova // The Journal of Social Sciences Research. – 2018, No. Special Issue 5. – P. 181–187. – DOI 10.32861/jssr.spi5.181.187. – EDN CRQEYU.
30. Averin, G. V. O spravedlivosti printsipa sootvetstvennykh sostoianii dlia sistem razlichnoi prirody / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serii: Ekonomika. Informatika. – 2017. – № 16(265). – S. 104–112. – EDN ZGZCJR.

Поступила в редакцию 01.12.2025 г., рекомендована к изданию 28.02.2026 г.

PHENOMENOLOGICAL APPROACH TO THE COMPLEX ASSESSMENT OF THE COMPLEXITY OF MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS

Averin G.V., Zviagintseva A.V., Brazhnikov A.R.

The article discusses the problem of quantifying the complexity of multidimensional non-stationary systems, which is relevant for areas such as monitoring financial markets, climate processes, and technical systems. It analyzes existing approaches, including entropy-based, algorithmic, early warning signal (EWS), and structural methods. The article identifies limitations of these methods in terms of their universality and complexity. The proposed approach focuses on phenomenological modeling and identifying stable macroscopic patterns of complexity by applying general system models for analyzing and interpreting empirical data. Developed phenomenological models of describing the state space of the system based on data and proposed various integral measures of complexity. Formulated criteria for assessing the structural, dynamic, systemic, descriptive and relative complexity of systems. The phenomenological approach allows for universal application to multidimensional systems of various natures.

Keywords: complexity, multidimensional systems, phenomenological models, information measures, complexity criteria, comprehensive assessment.

Аверин Геннадий Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: averin.gennadiy@gmail.com

Averin Gennadii Viktorovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0003-1070-3677

Звягинцева Анна Викторовна

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

Zviagintseva Anna Viktorovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0003-2218-9230

Бражников Андрей Романович

стажёр-исследователь ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: yanox123321@gmail.com

Brazhnikov Andrei Romanovich

Intern Researcher of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0005-4420-9206

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИКИ PROMPT ENGINEERING НА ТОЧНОСТЬ ОТВЕТОВ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

© 2026 Слипченко М.К., Рычка О.В.

В статье рассматривается актуальная задача повышения точности ответов больших языковых моделей (LLM) в чат-ботах. Проблема определяется чувствительностью LLM к структуре промптов и вероятностью появления некорректных ответов. Для оптимизации работы без дообучения применяются техники Prompt Engineering: zero-shot, one-shot, few-shot, role prompting, zero-CoT, Re2 и RaR. Эксперименты на датасетах GSM8K, MMLU и BigBench Hard показали доменно-зависимый прирост точности до 15% при комбинированных подходах. Сделан вывод об эффективности адаптивного промптинга для повышения качества ответов LLM.

Ключевые слова: Prompt Engineering, большие языковые модели, точность ответов.

Введение. С развитием технологий искусственного интеллекта большие языковые модели (LLM), такие как GPT-серия от OpenAI, Claude, Deepseek и другие, стали ключевыми инструментами для обработки естественного языка. Эти модели демонстрируют высокую эффективность в задачах генерации текста, перевода, суммаризации и ответа на вопросы [1].

Однако их производительность ограничена зависимостью от качества входных данных – промптов, а также склонностью к генерации недостоверной информации, известной как «галлюцинации». Нечеткие или неоднозначные промпты приводят к фактическим ошибкам и неполным ответам, что особенно критично в таких предметных областях, как образование, юриспруденция или медицина.

Prompt Engineering – подход, направленный на оптимизацию формулировок запросов для повышения точности и релевантности ответов LLM без необходимости их дообучения [2]. Эта техника становится всё более актуальной в условиях широкого применения LLM и ограниченных ресурсов для дообучения моделей на специализированных данных (fine-tuning). Хорошо структурированный промпт может минимизировать ошибки и улучшить качество ответов, делая модели доступными для пользователей без технической подготовки [3].

Целью данной работы является исследование влияния техник Prompt Engineering на точность ответов LLM в чат-ботах, с разработкой и сравнением базовых и оптимизированных промптов для демонстрации их эффективности.

Определение промпта. Промпт – это текстовый запрос, направленный на управление поведением большой языковой модели (LLM) для выполнения конкретной задачи, такой как генерация текста, ответ на вопрос или выполнение инструкции. Промпты различаются по степени сложности: от однозначных фактологических запросов до многокомпонентных инструкций, задающих контекст, роль модели и ограничения на формат ответа. Эффективность промпта зависит от четкости инструкций и релевантности контекста, что позволяет снизить вероятность ошибок и повысить качество ответов. Эффективный промпт формируется на основе следующих элементов:

1. Инструкции: четкие указания, что модель должна сделать;

2. Контекст (дополнительная информация, уточняющая условия задачи);
3. Ввод пользователя (конкретный запрос или данные, на основе которых модель генерирует ответ).

Prompt Engineering фокусируется на разработке инструкций и контекста, которые направляют LLM к более точным и осмысленным ответам (см. рис. 1). Эта оптимизация позволяет устранить неоднозначность и снизить вероятность «галлюцинаций» без изменения параметров модели [4].

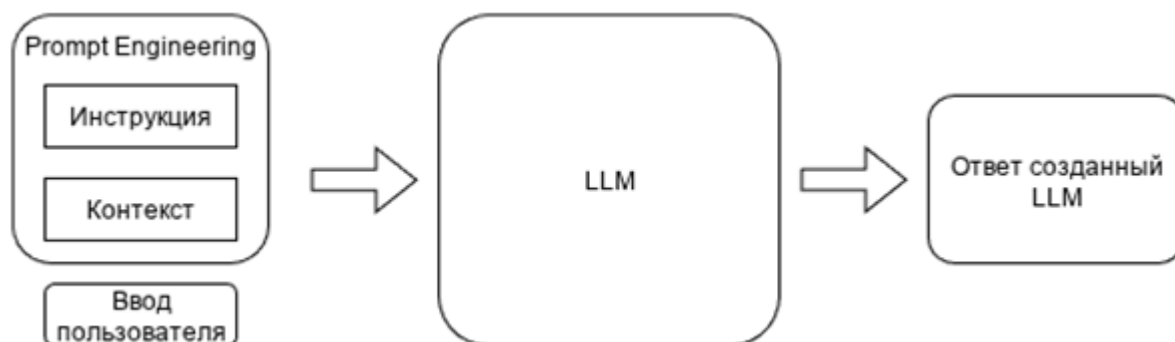


Рис. 1. Структура промпта для LLM

Обзор подходов. В последние годы Prompt Engineering эволюционировал от простых эвристик к систематическим методологиям, поддерживаемым эмпирическими исследованиями. Ниже приведен обзор техник, основанный на актуальных публикациях.

Zero-shot prompting. Данный подход является базовым и предполагает, что модель получает только описание задачи без каких-либо примеров или демонстраций. Модель полагается исключительно на свое предобученное знание, накопленное во время обучения на огромных корпусах данных. Этот метод особенно полезен для задач, где сбор примеров затруднен, таких как генерация текста или ответы на вопросы в новых доменах. Как отмечается в обзоре «A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications», zero-shot prompting часто сочетается с другими техниками, такими как emotion prompting или перефразирование, для повышения эффективности [5].

One-shot и Few-shot prompting. One-shot prompting предоставляет один пример входа-выхода, в то время как few-shot prompting включает несколько (обычно от 2 до 100) демонстраций для создания контекста [6, 7]. Эти методы опираются на in-context learning (ICL), где модель «учится» задаче на лету без обновления параметров. Few-shot prompting особенно эффективен для задач обработки естественного языка (NLP), таких как классификация текста или генерация, и может быть оптимизирован через выбор и порядок примеров.

Instruction prompting. Instruction prompting фокусируется на предоставлении явных инструкций в промпте для уточнения задачи, часто без примеров. Этот подход подчеркивает желаемый формат вывода, стиль или ограничения, делая его подходящим для zero-shot сценариев. В «The Prompt Report» instruction prompting классифицируется как часть системных промптов, где инструкции устанавливают правила взаимодействия [8].

Role prompting. Role prompting (или persona prompting) назначает модели конкретную роль или персону, чтобы адаптировать ее поведение и стиль ответа. Это стимулирует модель имитировать эксперта, что полезно для креативных или доменно-

специфических задач [9]. Role prompting часто интегрируется с другими методами для улучшения открытого генератива.

Zero-shot Chain-of-Thought. Chain-of-Thought (CoT) – техника prompting, направленная на генерацию промежуточных рассуждений для повышения точности и прозрачности ответов. В отличие от прямого ответа, модель строит последовательность логических шагов («цепочку мыслей»), что улучшает выполнение арифметических, логических и задач здравого смысла. Использование CoT позволяет крупным языковым моделям выходить за рамки поверхностных шаблонов и приближаться к многошаговому рассуждению [10].

Zero-shot Chain-of-Thought является частным случаем CoT, в котором модель побуждается рассуждать пошагово без предоставления обучающих примеров. Для этого в prompt включается простая инструкция-триггер, запускающая у модели механизм разложения задачи на этапы. В работе Kojima с соавторами [11], Zero-shot CoT значительно повышает качество вывода в задачах арифметики и логики, оставаясь универсальной стратегией там, где невозможно заранее подготовить демонстрации.

Re-reading (RE2). Re-reading (RE2) – техника, повышающая точность языковых моделей путем повторного прочтения запроса для минимизации ошибок из-за невнимательности. Модель получает инструкцию «Read the question again:» («Прочтите вопрос еще раз:») с дублированным запросом, что побуждает к переоценке деталей. Подходит для арифметических, логических задач и задач здравого смысла, часто комбинируется с Chain-of-Thought (CoT) [12].

Rephrase and Respond (RaR). Rephrase and Respond (RaR) – метод, улучшающий ответы модели через перефразировку вопроса перед ответом, снижая неоднозначность [13]. Модель получает инструкцию: «Rephrase and expand the question, and respond» («Перефразируйте и расширьте вопрос и ответьте»). Эффективен для вопрос-ответных задач.

Методология исследования. Для оценки влияния техник Prompt Engineering на точность ответов больших языковых моделей в чат-ботах разработан эмпирический подход, основанный на сравнении ответов, полученных с использованием различных типов промптов. Исследование проводилось в контролируемой среде с применением модели qwen2.5:7b, развернутой и управляемой посредством Ollama – открытого программного обеспечения для развёртывания и запуска LLM на пользовательском оборудовании.

Для проведения эмпирического исследования были выбраны три датасета, охватывающие разные домены задач: математика, общее знание и рассуждение. Датасет GSM8K [14] содержит математические задачи для школьников, MMLU [15] – вопросы из различных дисциплин с вариантами ответов, а BigBench Hard [16] (подмножество «causal_judgement») – задачи на причинно-следственное рассуждение. Из каждого датасета отобрано по 55 примеров: первые 5 используются как примеры для техник one-shot и few-shot, а остальные 50 – для тестирования. Это обеспечивает разнообразие вопросов и позволяет оценить влияние промптинга на разные типы задач.

В эксперименте применены следующие техники Prompt Engineering: zero-shot (прямой вопрос без примеров), one-shot (с одним примером), few-shot (с тремя примерами), role (ролевое назначение модели как эксперта в домене), zero-CoT (chain-of-thought без примеров, с фразой «Let's think step by step»), Re2 (повторное прочтение вопроса), RaR (перефразирование и расширение вопроса) и комбинированная role+zero-CoT+Re2+RaR (интеграция ролевого назначения, повторного чтения, перефразирования и цепочки мыслей). Для генерации промптов используется функция,

которая адаптирует шаблон в зависимости от техники, домена и доступных примеров (при необходимости случайным образом перемешивая их для вариативности).

Оценка результатов проводилась преимущественно с использованием подхода LLM as a Judge [17], представляющего собой методологию, при которой одна большая языковая модель выступает в роли автоматизированного оценщика (судьи) для анализа качества текстовых выходов другой LLM. Этот подход позволяет аппроксимировать человеческую оценку, снижая субъективность и затраты на ручную разметку, и основан на предоставлении судье специального промпта с четкими критериями оценки [18]. В отличие от традиционных метрик, таких как BLEU [19] или ROUGE [20], которые ориентированы на поверхностное совпадение строк, LLM as a Judge способен учитывать семантику, контекст и нюансы естественного языка, имитируя человеческие суждения [21]. Методология включает несколько ключевых этапов:

1. определение оценочного промпта с рубрикой критериев (например, на основе шкалы Ликерта или числовой балльной системы);
2. предоставление судье пары "генерированный ответ – эталонный ответ" для сравнения;
3. генерацию оценки с обоснованием;
4. агрегацию результатов для статистического анализа.

Преимущества подхода включают автоматизацию, масштабируемость и снижение затрат по сравнению с человеческим аннотированием, однако потенциальные ограничения связаны с предвзятостью судьи (bias), необходимостью калибровки модели и зависимостью от качества промпта для судьи [22].

В рамках исследования в роли судьи использовалась отдельная модель qwen3:4b-instruct-2507-fp16, которая оценивала сгенерированные ответы по шкале 1-10 баллов по четырем ключевым критериям: релевантность (насколько ответ соответствует исходному запросу), полнота (насколько ответ охватывает информацию из эталонного ответа), ясность (насколько ответ понятен и легко воспринимается) и точность (насколько ответ фактически корректен по сравнению с эталонным ответом). Для повышения надежности оценки промпт судьи включал детальные инструкции по каждому критерию, а также требование предоставлять обоснование баллов. Такой подход обеспечивает статистическую надежность и выявление наиболее эффективных техник для повышения точности LLM.

Результаты экспериментов. Сводные числовые результаты экспериментов представлены в таблице 1, где приведены средние значения метрик релевантности, полноты, ясности и точности для трёх наборов данных – GSM8K, MMLU и BigBench Hard. Визуализированные зависимости показаны на рисунках 2-4, где каждая группа столбчатых диаграмм иллюстрирует сравнительные показатели эффективности техник Prompt Engineering для соответствующего домена.

Анализ результатов для набора GSM8K (рис. 2) показывает, что базовая техника zero-shot prompting демонстрирует наивысшие средние значения по всем метрикам: релевантность – 9.76, полнота – 9.50, ясность – 9.85, точность – 9.64. Эти результаты сопоставимы или превышают показатели альтернативных методов, включая few-shot, Re2, role и комбинированные подходы. Фактически, различия между техниками находятся в пределах стандартного отклонения, что указывает на статистическую эквивалентность большинства методов при решении задач данного типа. Устойчивость zero-shot объясняется спецификой GSM8K – формализованными арифметическими задачами, где внутренние способности модели к детерминированному выводу достаточны без дополнительного контекста.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Датасет	Техника	релевантность			полнота			ясность			точность		
		ср.зн.	откл.	n	ср.зн.	откл.	n	ср.зн.	откл.	n	ср.зн.	откл.	n
big_bench_hard	few_shot	8.37	1.67	149	5.97	1.65	149	9.08	1.35	149	7.41	3.51	149
	one_shot	8.15	1.74	150	5.37	1.38	150	9.09	1.29	150	7.70	3.36	150
	rar	8.39	1.85	150	7.91	2.11	150	9.51	0.50	150	7.61	2.98	150
	re2	8.83	1.62	150	7.77	2.33	150	9.53	0.50	150	7.71	3.13	150
	role	8.61	1.78	150	7.63	2.12	150	9.43	0.50	150	7.43	3.15	150
	role+zero_cot+re2+rar	8.81	1.62	150	8.07	2.03	150	9.54	0.50	150	8.01	2.92	150
	zero_cot	8.77	1.73	150	8.01	2.29	150	9.45	0.53	150	7.55	3.09	150
	zero_shot	8.87	1.64	150	7.79	2.24	150	9.61	0.49	150	7.67	3.17	150
gsm8k	few_shot	9.56	1.18	150	9.02	1.87	150	9.73	0.56	150	9.24	2.03	150
	one_shot	8.94	2.27	149	8.63	2.45	149	9.67	0.56	149	8.91	2.48	149
	rar	9.65	1.15	150	9.41	1.67	150	9.88	0.35	150	9.40	1.78	150
	re2	9.77	0.88	150	9.50	1.40	150	9.91	0.29	150	9.59	1.58	150
	role	9.75	0.78	150	9.35	1.55	150	9.85	0.40	150	9.51	1.56	150
	role+zero_cot+re2+rar	9.77	0.71	150	9.41	1.51	150	9.89	0.31	150	9.51	1.63	150
	zero_cot	9.73	0.86	150	9.44	1.47	150	9.89	0.32	150	9.48	1.70	150
	zero_shot	9.76	1.04	150	9.50	1.71	150	9.85	0.42	150	9.64	1.48	150
mmlu	few_shot	6.70	2.91	142	5.03	2.66	142	8.04	2.15	142	5.21	3.50	142
	one_shot	7.55	8.40	142	6.42	8.50	142	8.84	8.00	142	6.58	8.70	142
	rar	8.71	1.93	136	8.13	2.38	135	9.22	1.55	136	7.96	2.95	136
	re2	9.22	1.50	143	8.04	2.37	143	9.20	1.45	143	8.34	2.75	143
	role	9.65	7.95	139	8.53	8.24	139	9.92	7.86	139	8.67	8.32	142
	role+zero_cot+re2+rar	9.14	1.64	146	7.84	2.49	146	9.42	1.33	146	8.05	2.89	146
	zero_cot	9.03	1.76	145	8.06	2.41	145	8.88	2.01	145	8.46	2.68	145
	zero_shot	9.16	7.88	144	7.97	6.55	144	9.71	6.85	147	7.85	6.07	147

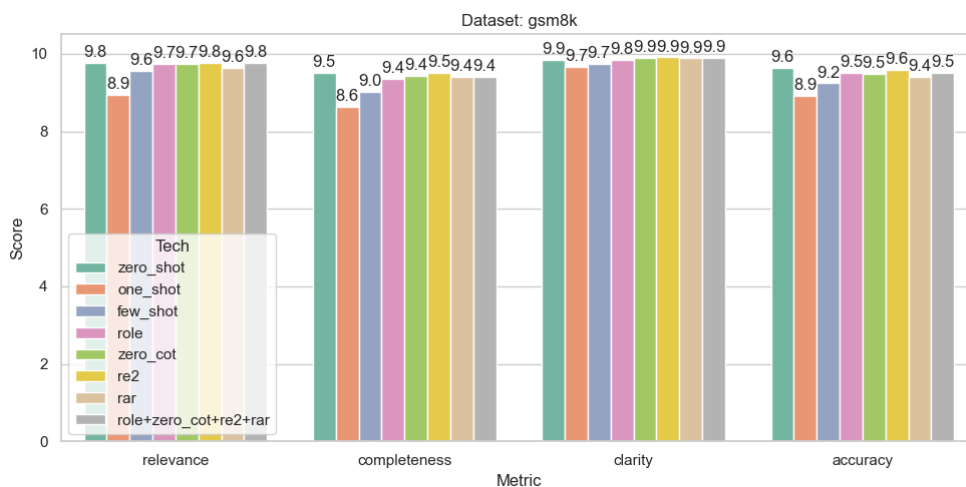


Рис. 2. Результаты по датасету GSM8K

В таких условиях введение обучающих примеров или усложнённых инструкций не приводит к улучшению результатов и иногда даже снижает точность за счёт информационной избыточности промпта. Таким образом, для задач с однозначной структурой и чёткими правилами формулировки zero-shot prompting является оптимальным решением.

Для набора MMLU (рис. 3) наблюдается иная тенденция. Здесь результаты по метрикам варьируются значительно сильнее: средние значения релевантности находятся в диапазоне от 6.7 до 9.6 баллов, полноты – от 5.0 до 8.5, ясности – от 8.0 до 9.9, а точности – от 5.2 до 8.7. Наиболее высокие результаты демонстрирует техника role, обеспечивая максимальные показатели по релевантности (9.6), ясности (9.9) и точности (8.7), что свидетельствует о её эффективности при решении задач комплексного характера. При этом комбинированные подходы (zero-CoT, Re2, rar) демонстрируют сопоставимые, но несколько более сбалансированные результаты, обеспечивая устойчивость по метрикам полноты и ясности. Таким образом, можно заключить, что ролевой промптинг наиболее полно раскрывает потенциал модели в рамках MMLU, где критичны не только структура рассуждений, но и контекстуальная релевантность ответов.

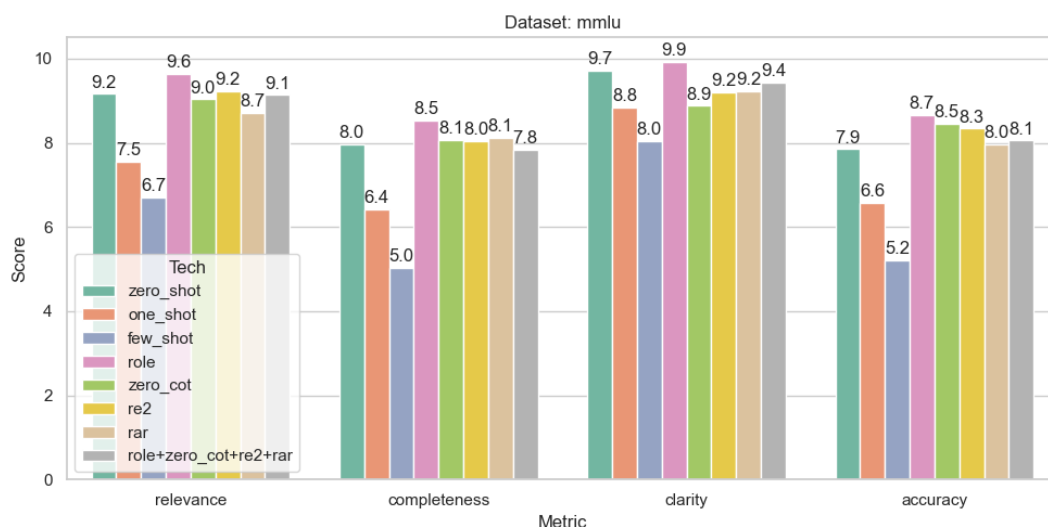


Рис. 3. Результаты по датасету MMLU

Датасет BigBench Hard (рис. 4), включающий задачи на причинно-следственные рассуждения, продемонстрировал наибольшую чувствительность к структуре промпта. Средняя точность ответов варьировала от 7.4 до 8.0 баллов, а полнота – от 5.4 до 8.1. Наиболее сбалансированные результаты демонстрирует комбинированный подход (role + zero-CoT + Re2 + RaR), обеспечивающий максимальные показатели по полноте (8.1) и точности (8.0) при сохранении высокой релевантности (8.8). Техники Re2 и RaR также оказывают положительное влияние за счёт активации механизмов повторного осмысления и уточнения запроса, что особенно важно для задач, требующих построения логической цепочки вывода. При этом метод zero-shot сохраняет лидерство по показателю ясности (9.6), демонстрируя, что простые, но чётко сформулированные инструкции способны повысить интерпретируемость рассуждений модели. Таким образом, повышение точности при комбинировании методов подтверждает гипотезу о синергетическом взаимодействии когнитивных подсказок, обеспечивающем более устойчивое и связное рассуждение модели.

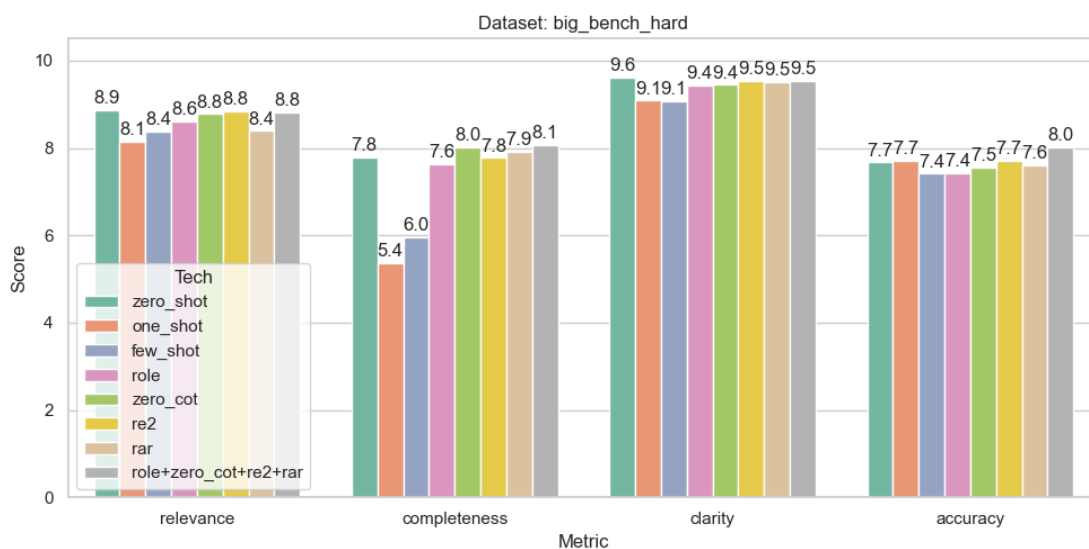


Рис. 4. Результаты по датасету BigBench Hard

Обобщённый анализ трёх наборов данных демонстрирует, что эффективность техник Prompt Engineering имеет ярко выраженную доменно-зависимую специфику. В задачах с чётко формализованной структурой (например, GSM8K) наилучшие результаты достигаются при использовании простых инструкций без контекстных примеров (zero-shot). Напротив, в задачах, требующих причинно-следственных рассуждений (BigBench Hard) или междисциплинарного анализа (MMLU), более результативными оказываются подходы, стимулирующие пошаговое рассуждение и переоценку запроса (zero-CoT, Re2, RaR). Следовательно, выбор конкретной техники промптинга должен определяться когнитивной природой задачи, а также уровнем неопределённости и сложности входных данных, что подчёркивает необходимость адаптивных стратегий проектирования подсказок.

Выводы. Проведённое исследование показало, что влияние техник Prompt Engineering на качество ответов больших языковых моделей носит выраженный контекстно-зависимый характер. Для формализованных задач, представленных набором GSM8K, базовый zero-shot prompting обеспечивает наивысшие результаты по всем исследованным метрикам, что подтверждает достаточность внутренних представлений модели для детерминированного вывода без внешних уточнений. Для задач рассуждения (BigBench Hard) и междисциплинарных вопросов (MMLU) эффективность повышается при использовании техник role, Re2, zero-CoT и их комбинаций, которые способствуют пошаговой декомпозиции задачи и снижению когнитивной неопределённости.

Комбинированный подход, включающий ролевое позиционирование, повторное чтение и перефразирование запроса, обеспечивает наилучшее соотношение точности, полноты и ясности ответов в условиях высокой семантической сложности. Результаты, представленные в таблице 1 и на рисунках 2-4, подтверждают, что оптимизация формулировок промптов позволяет достичь прироста точности до 10-15 % по сравнению с базовыми техниками, не прибегая к дополнительному обучению модели. Таким образом, Prompt Engineering является эффективным инструментом управляемого повышения качества вывода LLM, а дальнейшие исследования в этом направлении целесообразно ориентировать на разработку адаптивных систем динамического построения промптов в зависимости от типа задачи и контекста взаимодействия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. GPT-4 Technical Report / OpenAI, J. Achiam, S. Adler [et al.] // arXiv preprint – 2024. – arXiv 2303.08774.
2. Velasquez-Henao, Ju. D. Prompt Engineering: a methodology for optimizing interactions with AI-Language Models in the field of engineering / Ju. D. Velasquez-Henao, C. Ja. Franco-Cardona, L. Cadavid-Higuaita // Dyna-Colombia. – 2023. – Vol. 90, No. 230. – P. 9-17. – DOI 10.15446/dyna.v90n230.111700. – EDN ICGTLM.
3. Prompt Engineering or Fine-Tuning: An Empirical Assessment of LLMs for Code / J. Shin [et al.] // arXiv preprint – 2025. – arXiv 2310.10508.
4. Barkley, L. Investigating the Role of Prompting and External Tools in Hallucination Rates of Large Language Models / L. Barkley, B. van der Merwe // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2410.19385.
5. A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications / P. Sahoo [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv 2402.07927.
6. Kulikov, V. A Brief Overview Of Few-Shot Prompting In the Large Language Models / V. Kulikov, R. Neychev // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2023. – No. 33. – P. 364-370. – EDN YTPAJU.
7. Lee, S. Schema Retrieval for Korean Geographic Knowledge Base Question Answering Using Few-Shot Prompting / S. Lee, K. Yu // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2024. – Vol. 13, No. 12. – P. 453. – DOI 10.3390/ijgi13120453. – EDN PJNINJ.
8. The Prompt Report: A Systematic Survey of Prompt Engineering Techniques / S. Schulhoff [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv 2406.06608.
9. Aher, G. Using Large Language Models to Simulate Multiple Humans and Replicate Human Subject Studies / G. Aher [et al.] // arXiv preprint. – 2023. – arXiv 2208.10264.
10. Chain of Thought Utilization in Large Language Models and Application in Nephrology / J. Miao, Ch. Thongprayoon, S. Suppadungsuk [et al.] // Medicina (Kaunas, Lithuania). – 2024. – Vol. 60, No. 1. – P. 148. – DOI 10.3390/medicina60010148. – EDN OCJFSO.
11. Large Language Models are Zero-Shot Reasoners / T. Kojima [et al.] // arXiv preprint. – 2023. – arXiv 2205.11916.
12. Re-Reading Improves Reasoning in Large Language Models / X. Xu [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2309.06275.
13. Rephrase and Respond: Let Large Language Models Ask Better Questions for Themselves / Y. Deng [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2311.04205.
14. Training Verifiers to Solve Math Word Problems / K. Cobbe [et al.] // arXiv preprint. – 2021. – arXiv 2110.14168.
15. Measuring Massive Multitask Language Understanding / D. Hendrycks [et al.] // arXiv preprint. – 2021. – arXiv 2009.03300.
16. Challenging BIG-Bench Tasks and Whether Chain-of-Thought Can Solve Them / M. Suzgun [et al.] // arXiv preprint. – 2022. – arXiv 2210.09261.
17. LLMs-as-Judges: A Comprehensive Survey on LLM-based Evaluation Methods / H. Li, Q. Dong, J. Chen [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2412.05579.
18. EvalLLM: LLM assisted evaluation of generative outputs / M. Desmond, Z. Ashktorab, Q. Pan [et al.] // Companion Proceedings of the 29th International Conference on Intelligent User Interfaces. – ACM, 2024. – P. 30–32. – DOI 10.1145/3640544.3645216.
19. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation / K. Papineni, S. Roukos, T. Ward [et al.] // Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics – Association for Computational Linguistics, 2001. – P. 311. – DOI 10.3115/1073083.1073135.
20. A Survey on Evaluation Metrics for Machine Translation / S. Lee, J. Lee, H. Moon [et al.] // Mathematics. – 2023. – T. 11, № 4. – P. 1006. – DOI 10.3390/math11041006.
21. LLM-as-a-qualitative-judge: automating error analysis in natural language generation / N. Chirkova, T. O. Ajayi, S. Aucock [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv 2506.09147.
22. Тетеревенков, Д. Л. Экспертно-ориентированные методы оценки качества текстовой генерации больших языковых моделей / Д. Л. Тетеревенков // Мягкие измерения и вычисления. – 2025. – Т. 90, №5. – С. 30–37. – DOI 10.36871/2618-9976.2025.05.003. – EDN WRVOBU.

REFERENCES LIST

1. GPT-4 Technical Report / OpenAI, J. Achiam, S. Adler [et al.] // arXiv preprint – 2024. – arXiv 2303.08774.
2. Velasquez-Henao, Ju. D. Prompt Engineering: a methodology for optimizing interactions with AI-Language Models in the field of engineering / Ju. D. Velasquez-Henao, C. Ja. Franco-Cardona, L. Cadavid-Higuaita // Dyna-Colombia. – 2023. – Vol. 90, No. 230. – P. 9-17. – DOI 10.15446/dyna.v90n230.111700. – EDN ICGTLM.
3. Prompt Engineering or Fine-Tuning: An Empirical Assessment of LLMs for Code / J. Shin [et al.] // arXiv preprint – 2025. – arXiv 2310.10508.
4. Barkley, L. Investigating the Role of Prompting and External Tools in Hallucination Rates of Large Language Models / L. Barkley, B. van der Merwe // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2410.19385.
5. A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications / P. Sahoo [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv 2402.07927.
6. Kulikov, V. A Brief Overview Of Few-Shot Prompting In the Large Language Models / V. Kulikov, R. Neychev // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2023. – No. 33. – P. 364-370. – EDN YTPAJU.
7. Lee, S. Schema Retrieval for Korean Geographic Knowledge Base Question Answering Using Few-Shot Prompting / S. Lee, K. Yu // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2024. – Vol. 13, No. 12. – P. 453. – DOI 10.3390/ijgi13120453. – EDN PJNINJ.
8. The Prompt Report: A Systematic Survey of Prompt Engineering Techniques / S. Schulhoff [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv 2406.06608.
9. Aher, G. Using Large Language Models to Simulate Multiple Humans and Replicate Human Subject Studies / G. Aher [et al.] // arXiv preprint. – 2023. – arXiv 2208.10264.
10. Chain of Thought Utilization in Large Language Models and Application in Nephrology / J. Miao, Ch. Thongprayoon, S. Suppadungsuk [et al.] // Medicina (Kaunas, Lithuania). – 2024. – Vol. 60, No. 1. – P. 148. – DOI 10.3390/medicina60010148. – EDN OCJFSO.
11. Large Language Models are Zero-Shot Reasoners / T. Kojima [et al.] // arXiv preprint. – 2023. – arXiv 2205.11916.
12. Re-Reading Improves Reasoning in Large Language Models / X. Xu [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2309.06275.
13. Rephrase and Respond: Let Large Language Models Ask Better Questions for Themselves / Y. Deng [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2311.04205.
14. Training Verifiers to Solve Math Word Problems / K. Cobbe [et al.] // arXiv preprint. – 2021. – arXiv 2110.14168.
15. Measuring Massive Multitask Language Understanding / D. Hendrycks [et al.] // arXiv preprint. – 2021. – arXiv 2009.03300.
16. Challenging BIG-Bench Tasks and Whether Chain-of-Thought Can Solve Them / M. Suzgun [et al.] // arXiv preprint. – 2022. – arXiv 2210.09261.
17. LLMs-as-Judges: A Comprehensive Survey on LLM-based Evaluation Methods / H. Li, Q. Dong, J. Chen [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2412.05579.
18. EvaluLLM: LLM assisted evaluation of generative outputs / M. Desmond, Z. Ashktorab, Q. Pan [et al.] // Companion Proceedings of the 29th International Conference on Intelligent User Interfaces. – ACM, 2024. – P. 30–32. – DOI 10.1145/3640544.3645216.
19. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation / K. Papineni, S. Roukos, T. Ward [et al.] // Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. – Association for Computational Linguistics, 2001. – P. 311. – DOI 10.3115/1073083.1073135.
20. A Survey on Evaluation Metrics for Machine Translation / S. Lee, J. Lee, H. Moon [et al.] // Mathematics. – 2023. – T. 11, № 4. – P. 1006. – DOI 10.3390/math11041006.
21. LLM-as-a-qualitative-judge: automating error analysis in natural language generation / N. Chirkova, T. O. Ajayi, S. Aycok [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – arXiv 2506.09147.
22. Teterenkov, D. L. Ekspertno-orientirovannye metody otsenki kachestva tekstovoi generatsii bolshikh iazykovykh modelei / D. L. Teterenkov // Miagkie izmereniia i vychisleniia. – 2025. – T. 90, №5. – S. 30–37. – DOI 10.36871/2618-9976.2025.05.003. – EDN WRVOBU.

Поступила в редакцию 03.12.2025 г., рекомендована к изданию 06.02.2026 г.

**THE IMPACT OF PROMPT ENGINEERING ON THE ACCURACY OF LARGE LANGUAGES
MODELS RESPONSES**

Slipenko M.K., Rychka O.V.

The article addresses the relevant task of improving the response accuracy of large language models (LLMs) in chatbots. The problem is defined by the models' sensitivity to prompt structure and the likelihood of generating incorrect responses. To optimize LLM performance without retraining, several Prompt Engineering techniques are applied, including zero-shot, one-shot, few-shot, role prompting, zero-CoT, Re2, and RaR. Experiments on the GSM8K, MMLU, and BigBench Hard datasets demonstrated domain-dependent accuracy improvements of up to 15% when using combined approaches. The study confirms the effectiveness of adaptive prompting in enhancing the quality of LLM responses.

Keywords: Prompt Engineering, large language models, response accuracy.

Слипенко Максим Константинович

младший программист 1 категории отдела систем виртуализации и облачных технологий ООО «Базальт СПО»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: maxim@slipenko.com

Slipenko Maksim Konstantinovich

Junior Programmer at Virtualization and Cloud Technologies Department of BaseALT LLC,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0009-0002-7691-2973

Рычка Ольга Валентиновна

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии им. Л. П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: olga_rychka@mail.ru

Rychka Olga Valentinovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Software Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0002-9066-6134

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ НАЗЕМНОГО ПРИБОРА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО ГИРОСКОПА© 2026 *Наумов М.А., Волуева О.С.*

В статье представлены методы и результаты экспериментальной оценки точности определения пространственной ориентации наземного измерительного прибора на основе динамически настраиваемого гироскопа и акселерометров. Рассмотрены алгоритмы вычисления углов ориентации Эйлера–Крылова, включая азимутальный угол и углы наклона. Выполнен анализ основных источников погрешностей, связанных с фазовым сдвигом датчика угловой скорости, задержками считывания энкодера и шумовой составляющей выходного сигнала. Предложен метод компенсации фазовой погрешности, основанный на вращении платформы в противоположных направлениях и усреднении результатов. Экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода и повышение точности определения ориентации.

Ключевые слова: гироскоп, датчик угловой скорости, акселерометр, ориентация, азимут, углы Эйлера–Крылова, измерительная платформа, погрешность измерений, навигационные системы.

Введение. Определение пространственного положения наземного навигационного и измерительного оборудования является фундаментальной задачей для систем, отвечающих за автоматизированное управление, навигацию и стабилизацию. Эта задача становится особенно критичной в условиях, когда использование спутниковых навигационных технологий затруднено или полностью недоступно, но при этом предъявляются строгие требования к топографической точности. В таких сценариях активно используются инерциальные измерительные системы, работающие автономно и основанные на показаниях гироскопических датчиков и акселерометров.

Современный прогресс в области гироскопических устройств позволил внедрить динамически регулируемые гироскопы, которые характеризуются значительной чувствительностью и способностью минимизировать определенные типы ошибок. Тем не менее, в условиях эксплуатации, связанных с вращением подвижных платформ, по-прежнему наблюдается влияние фазовых искажений и шума на выходные сигналы, что негативно сказывается на точности определения углов ориентации. Поэтому разработка и экспериментальная проверка методик, направленных на повышение точности определения угловых параметров наземных приборов с использованием гироскопических данных, является актуальной областью исследований.

Состав и принцип работы прибора. Составные части прибора и их положение относительно опорной и связанной с корпусом прибора системы координат показаны на рис. 1. На рис. 1 обозначено:

– $O_0\xi_0\eta_0\zeta_0$ – горизонтальная, географически ориентированная, правая опорная система координат, ось $O_0\zeta_0$ которой направлена по вертикали вниз; оси $O_0\xi_0$ и $O_0\eta_0$ расположены в плоскости горизонта, причем ось $O_0\xi_0$ направлена на географический Север;

– $O_0X_0Y_0Z_0$ – правая система координат, связанная с корпусом прибора; ось O_0Z_0 направлена вдоль оси вращения платформы в сторону нижней части прибора; оси O_0X_0 и O_0Y_0 лежат в экваториальной плоскости прибора;

– $O_0X_{II}Y_{II}Z_{II}$ – правая система координат, связанная с платформой; ось O_0Z_{II} совпадает с осью O_0Z_0 ; оси O_0X_{II} и O_0Y_{II} в исходном положении совпадают с осями O_0X_0 и O_0Y_0 соответственно;

– Ψ , Θ , Φ – углы Эйлера-Крылова, характеризующие ориентацию системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ по отношению к СК $O_0\xi_0\eta_0\zeta_0$; угол Ψ будем называть азимутальным углом прибора;

– ε – угол поворота платформы вокруг оси O_0Z_{II} ;

– A_{X_0} , A_{Y_0} – акселерометры, установленные по осям O_0X_0 и O_0Y_0 соответственно.

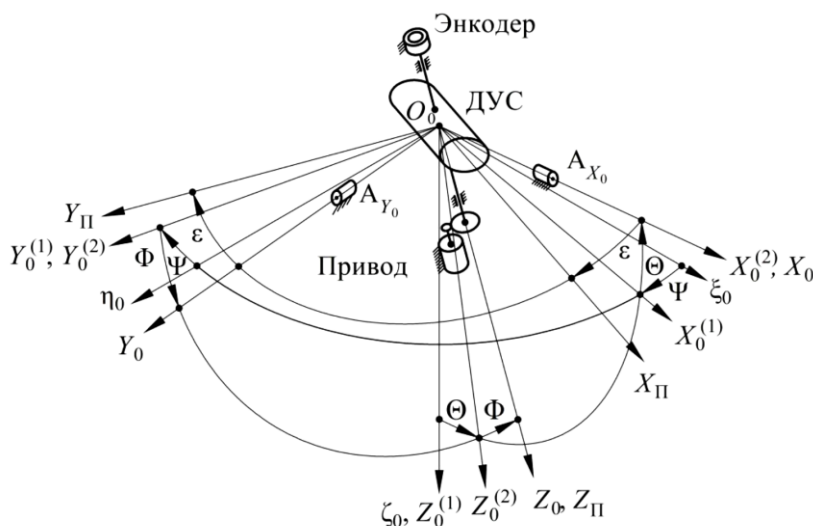


Рис. 1. Составные части системы и их положение относительно опорной и связанной с корпусом прибора систем координат

Принцип работы прибора. При работе измерительной системы, при равномерном вращении платформы с постоянной угловой скоростью, выходное напряжение датчика угловой скорости (ДУС) проявляет чёткую гармоническую зависимость от истинного угла поворота платформы по отношению к корпусу прибора (ε). За один полный оборот (360°) данный сигнал дважды проходит через ноль — в те моменты, когда чувствительная ось ДУС оказывается перпендикулярной горизонтальной компоненте угловой скорости вращения Земли.

В алгоритме производится фиксация первых двух подряд идущих значений угла ε (обозначаемых как ε_1 и ε_2), зафиксированных в тех точках, где сигнал достигает нулевого уровня. Эти значения отмечают ключевые позиции платформы внутри корпуса. Для установки ориентира на условный «Север» рассчитывается среднеарифметическая величина между этими двумя углами. Такой подход позволяет точно определить середину интервала между двумя нулевыми показаниями, что соответствует максимуму (или минимуму) гармонической кривой.

Из-за симметрии функции косинуса, обладающего двумя экстремумами равной величины, но разного знака за период, однозначное установление направления "Север" возможно лишь при анализе знака производной сигнала ARC при переходе через одну из нулевых точек (например, ε_1).

Положительная производная сигнала постоянного тока в точке ε_1 свидетельствует о возрастающем значении сигнала, что предвещает достижение последующего пика. В этом случае среднее арифметическое угловых значений будет соответствовать направлению условного Севера (ε_N).

Отрицательная же производная в точке ε_1 указывает на снижение сигнала, а значит, ближайший экстремум окажется отрицательным. В такой ситуации полученный угол будет ориентирован на условный Юг (ε_S) (см. рис. 2).

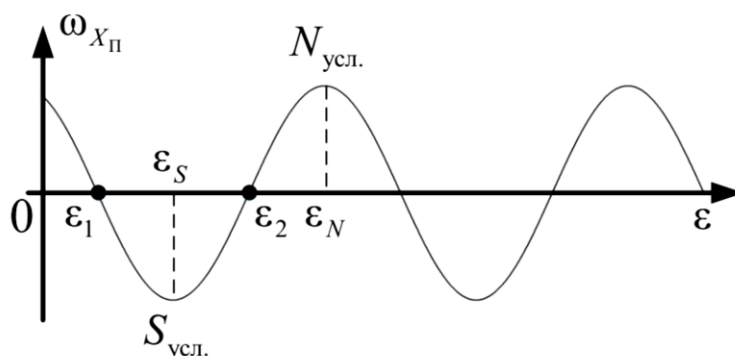


Рис. 2. График, поясняющий метод определения ориентации проекции вектора угловой скорости вращения Земли на экваториальную плоскость прибора $N_{усл.}$ — условный Север; $S_{усл.}$ — условный Юг

В данном методе под «условным Севером» понимается угловое положение платформы (ε), при котором проекция вектора угловой скорости Земли на чувствительную ось гирокомпаса принимает наибольшее по модулю положительное значение. Соответственно, «условный Юг» — это положение, при котором указанная проекция минимальна по значению, но максимальна по модулю.

Следует подчеркнуть, что совпадение терминов «условный» и «истинный» Север/Юг возможно исключительно при строгой вертикальности оси вращения платформы. В идеальном варианте плоскость вращения оказывается горизонтальной, а чувствительная ось гирокомпаса точно совпадает с меридианом. Любой наклон оси вызывает рассогласование этих направлений, что представляет собой ключевое ограничение классических гирокомпасов и демонстрирует необходимость применения усложнённых алгоритмов для систем, реализующих полную пространственную ориентацию.

Угловое значение, полученное на предыдущем этапе и обозначающее положение условного Севера (ε_N) либо Юга (ε_S) платформы, служит ключевым, хотя и промежуточным, элементом. Оно фиксирует ориентацию платформы относительно инерциальной системы координат, связанной с поверхностью Земли. Тем не менее, основная задача заключается в определении пространственного расположения корпуса измерительного устройства, что выражается через азимутальный угол. Для решения этой задачи требуется дополнительная информация о наклоне платформы относительно истинной вертикали.

Имея точно известный угол ε_N (или ε_S), а также данные о продольном (Θ) и поперечном (Φ) наклонах платформы, можно выполнить расчет искомого азимутального угла (Ψ). Данный угол Ψ соответствует углу между проекцией оси чувствительности датчика на горизонтальную плоскость и направлением на географический Север — что полностью соответствует стандартному понятию азимута в навигации.

В настоящей работе представлен эффективный вычислительный метод, позволяющий определить угол Ψ на основе следующих исходных величин:

- угол ε_N , указывающий направление условного Севера;
- угол Θ , характеризующий продольный наклон тела;
- угол Φ , отражающий поперечный наклон.

Вычисление углов Θ и Φ осуществляется на базе анализа сигналов акселерометров. Методика определения этих углов основана на анализе проекций вектора кажущегося ускорения (в состоянии покоя близкого к ускорению свободного падения) на оси чувствительности акселерометров. Решение систем уравнений, связывающих измеренные проекции с углами крена и тангажа, реализуется по принципам, аналогичным тем, которые применяются в системах управления гиросtabilизированными платформами для определения их ориентации относительно горизонтальной плоскости [1, 2]:

$$\Theta = \begin{cases} \Theta^* & \text{если } a_{X_0} > 0 \\ (\Theta^* + 360^\circ) & \text{если } a_{X_0} < 0 \end{cases};$$

$$\Phi = \begin{cases} \Phi^* & \text{если } a_{Y_0} > 0 \\ (\Phi^* + 360^\circ) & \text{если } a_{Y_0} < 0 \end{cases},$$

где главные значения Θ^* и Φ^* этих углов определяются по формулам:

$$\Theta^* = \arctg \frac{a_{X_0}}{\sqrt{g^2 - a_{X_0}^2}}; \Phi^* = \arctg \frac{a_{Y_0}}{\sqrt{g^2 - (a_{X_0}^2 + a_{Y_0}^2)}}.$$

Алгоритмы вычисления азимутального угла. Обозначим проекции вектора абсолютной угловой скорости вращения трёхгранника осей системы координат $O_0\xi_0\eta_0\zeta_0$: $\omega_{\xi_0}, \omega_{\eta_0}, \omega_{\zeta_0}$ соответственно. Поскольку вращения трёхгранника происходит по причине вращения Земли с угловой скоростью $\bar{\Omega}_3$, то с учётом ориентации СК $O_0\xi_0\eta_0\zeta_0$ относительно Земли имеем:

$$\omega_{\xi_0} = \Omega_3 \cdot \cos \varphi_0; \omega_{\eta_0} = 0, \omega_{\zeta_0} = -\Omega_3 \cdot \sin \varphi_0,$$

где φ_0 – широта местоположения прибора.

Найдём проекции вектора $\bar{\Omega}_3$ на ось O_0X_{II} . С этой целью сначала запишем выражения для проекций вектора $\bar{\Omega}_3$ на оси системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$:

$$\omega_{X_0} = \omega_{X_0^{(2)}} = \Omega_3 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \Psi \cdot \cos \Theta + \Omega_3 \cdot \sin \varphi_0 \cdot \sin \Theta;$$

$$\omega_{Y_0} = \omega_{Y_0^{(2)}} \cdot \cos \Phi + \omega_{Z_0^{(2)}} \sin \Phi = -\Omega_3 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \Psi \cos \Phi + (-\Omega_3 \cdot \sin \varphi_0 \cdot \cos \Theta +$$

$$+\Omega_3 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \Psi \cdot \sin \Theta) \cdot \sin \Phi;$$

$$\omega_{Z_0} = \omega_{Z_0^{(2)}} \cdot \cos \Phi - \omega_{Y_0^{(2)}} \sin \Phi = (-\Omega_3 \cdot \sin \varphi_0 \cdot \cos \Theta +$$

$$+\Omega_3 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \Psi \cdot \sin \Theta) \cdot \cos \Phi + \Omega_3 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \sin \Psi \cdot \sin \Phi.$$

Искомая проекция вектора угловой скорости вращения Земли на ось чувствительности ДУС O_0X_{II} определится как:

$$\omega_{X_{II}} = \omega_{X_0} \cdot \cos \varepsilon + \omega_{Y_0} \cdot \sin \varepsilon.$$

При $\varepsilon = \varepsilon_N$ функция $\omega_{X_{II}}(\varepsilon)$ имеет максимум и при этом положительна [3]. Это позволяет записать данное уравнение и неравенство:

$$-\omega_{X_0} \cdot \sin \varepsilon_N + \omega_{Y_0} \cdot \cos \varepsilon_N = 0;$$

$$\omega_{X_0} \cdot \cos \varepsilon_N + \omega_{Y_0} \cdot \sin \varepsilon_N > 0.$$

Выполнив подстановку в уравнение и неравенство выражения для угловых скоростей ω_{X_0} и ω_{Y_0} , получим следующее:

$$A_1 \cdot \cos \Psi + B_1 \cdot \sin \Psi + C_1 = 0;$$

$$A_2 \cdot \cos \Psi + B_2 \cdot \sin \Psi + C_2 > 0,$$

$$A_1 = \cos \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \cos \varepsilon_N - \cos \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \varepsilon_N;$$

$$B_1 = -\cos \varphi_0 \cdot \cos \Phi \cdot \cos \varepsilon_N;$$

где: $C_1 = -\sin \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \sin \varepsilon_N - \sin \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \cos \varepsilon_N;$

$$A_2 = \cos \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \sin \varepsilon_N + \cos \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \cos \varepsilon_N;$$

$$B_2 = -\cos \varphi_0 \cdot \cos \Phi \cdot \sin \varepsilon_N;$$

$$C_2 = \sin \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \cos \varepsilon_N - \sin \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \sin \varepsilon_N.$$

Уравнение с учётом неравенства не может дать однозначного решения для угла Ψ . Будем считать неизвестными в данных уравнении и неравенстве значения $\sin \Psi$ и $\cos \Psi$, добавив к этим уравнение, связывающее $\sin \Psi$ и $\cos \Psi$:

$$\sin^2 \Psi + \cos^2 \Psi = 1.$$

Выразим $\cos \Psi$:

$$\cos \Psi = \frac{-B_1 \cdot \sin \Psi - C_1}{A_1}.$$

Подставив, получим квадратное уравнение относительно $\sin \Psi$:

$$\sin^2 \Psi + \frac{(-B_1 \cdot \sin \Psi - C_1)^2}{A_1^2} = 1,$$

которое можно записать в виде:

$$(A_1^2 + B_1^2) \cdot \sin^2 \Psi + 2 \cdot B_1 \cdot C_1 \cdot \sin \Psi + (C_1^2 - A_1^2) = 0.$$

Дискриминант этого уравнения имеет вид:

$$\Delta = B_1^2 \cdot C_1^2 - (A_1^2 + B_1^2) \cdot (C_1^2 - A_1^2) = A_1^4 + A_1^2 \cdot B_1^2 - A_1^2 \cdot C_1^2.$$

Если $\Delta \geq 0$, то уравнение имеет два решения. Первое решение будет:

$$(\sin \Psi)_1 = \frac{B_1 \cdot C_1 + |\sqrt{\Delta}|}{(A_1^2 + B_1^2)} = \frac{B_1 \cdot C_1 + |A_1 \cdot \sqrt{(A_1^2 + B_1^2 - C_1^2)}|}{(A_1^2 + B_1^2)}.$$

Подставив первое решение для $\sin \Psi$, получим:

$$(\cos \Psi)_1 = \frac{-A_1^2 \cdot C_1 - B_1 \cdot |A_1 \cdot \sqrt{(A_1^2 + B_1^2 - C_1^2)}|}{A_1 \cdot (A_1^2 + B_1^2)}.$$

Тогда второе решение уравнения будет иметь вид:

$$(\sin \Psi)_2 = \frac{-B_1 \cdot C_1 - |\sqrt{\Delta}|}{(A_1^2 + B_1^2)} = \frac{-B_1 \cdot C_1 - |A_1 \cdot \sqrt{(A_1^2 + B_1^2 - C_1^2)}|}{(A_1^2 + B_1^2)}.$$

Соответственно, второе решение для $\cos \Psi$ будет иметь вид:

$$(\cos \Psi)_2 = \frac{-A_1^2 \cdot C_1 + B_1 \cdot |A_1 \cdot \sqrt{(A_1^2 + B_1^2 - C_1^2)}|}{A_1 \cdot (A_1^2 + B_1^2)}.$$

Из двух пар значений $(\sin \Psi)_1$, $(\cos \Psi)_1$ и $(\sin \Psi)_2$, $(\cos \Psi)_2$ выберем ту, которая удовлетворяет неравенству. Эта полученная пара значений синуса и косинуса искомого угла позволяет определить его единственное значение. Главное значение угла вычисляется по формуле [4]:

$$\Psi^* = \operatorname{arctg} \left[\frac{(\sin \Psi)_i}{(\cos \Psi)_i} \right],$$

где $i=1,2$.

Здесь под главным значением понимается значение острого угла, который может быть как положительным, так и отрицательным. Действительное значение угла Ψ будет определяться с учётом квадранта, в котором лежит угол по известным формулам приведения. Квадрант определяется по знакам $(\sin \Psi)_i$ и $(\cos \Psi)_i$. Алгоритм определения действительного значения угла Ψ будет:

$$\Psi = \begin{cases} \Psi^* & \text{если } (\sin \Psi)_i > 0 \text{ и } (\cos \Psi)_i > 0 \\ (\Psi^* + 180^\circ) & \text{если } (\sin \Psi)_i > 0 \text{ и } (\cos \Psi)_i < 0 \\ (\Psi^* + 180^\circ) & \text{если } (\sin \Psi)_i < 0 \text{ и } (\cos \Psi)_i < 0 \\ (\Psi^* + 360^\circ) & \text{если } (\sin \Psi)_i < 0 \text{ и } (\cos \Psi)_i > 0 \end{cases}.$$

Фазовая погрешность ДУС. При эксплуатации угловых измерительных устройств в условиях, когда угловая скорость изменяется по гармоническому закону [5], неизбежно возникают погрешности, именуемые динамическими ошибками. Они носят фундаментальный и методологический характер, обусловленный внутренними динамическими свойствами и конструкцией наиболее ответственного элемента системы. Методика анализа разделяет данные ошибки на два главных вида — амплитудные и фазовые.

Необходимо отметить, что в установившемся режиме, при равномерном вращении платформы, указанные погрешности принимают постоянные значения, что позволяет компенсировать их заранее через процедуру калибровки.

Как уже отмечалось, амплитудная составляющая ошибки, проявляющаяся в вариациях коэффициента усиления выходного сигнала, не влияет напрямую на точность определения полного угла. ε_N , если данное изменение остаётся стабильным на всём интервале измерений. Подобное искажение носит мультипликативный характер и воздействует равномерно на все звенья измерительной цепи, поэтому не вызывает смещения результата.

В противоположность этому, фазовая ошибка — то есть временной сдвиг между входным и выходным сигналами в системе управления — приводит к существенным

искажениям. Присутствие такого сдвига. влечёт за собой одинаковые по величине и знаку ошибки при расчёте промежуточных углов ε_1 и ε_2 . Поскольку итоговый угол ε_N зависит от этих величин, их совместная погрешность не компенсируется, а передаётся и аккумулируется в окончательном значении, снижая общую точность измерения.

Исследование динамических характеристик с использованием двухступенчатого гироскопа. позволяет выделить фундаментальное математическое выражение, определяющее особенности их поведения. Подобная структура. характерна. для двух главных видов гироскопических измерителей: приборов с механическим упругим элементом (например, пружины или тонкий торсионный стержень) и компенсационных устройств, где поддержание ротора. в нулевой позиции осуществляется за счёт системы обратной связи.

Основополагающим допущением для последующего анализа. служит отсутствие инерционных свойств в звене обратной связи. Следовательно, элементы, такие как усилители и преобразователи, демонстрируют реакцию на. изменение сигнала. практически мгновенно — без временных задержек, а. их динамические характеристики сводятся к простому коэффициенту усиления. При таких условиях математическая модель, связывающая выходное напряжение датчика. с входной угловой скоростью (так называемая передаточная функция), приобретает вид, характерный для устойчивой колебательной системы с обратной связью. Величина. фазового сдвига. такого звена. определяется по формуле [6]:

$$\Delta\varphi = -\arctg \frac{2\xi \cdot \eta}{1 - \eta^2}, \quad (1)$$

где: $\Delta\varphi$ – сдвиг фазы звена; ξ – коэффициент затухания звена; η – безразмерная частота, определяемая отношением круговой частоты изменения угловой скорости (скорости вращения платформы) к собственной частоте ДУС [7].

В табличном виде представлены данные о фазовых смещениях (таблица 1), зафиксированных при разных значениях безразмерной частоты изменения угловой скорости — обозначаемой как η — при значении коэффициента. затухания ξ , близком к оптимальному. При анализе гироскопических систем управления, основанных на. трёхосевых гироскопах, в том числе их динамически перестраиваемых вариантах, при применении инерционно-свободных схем обратной связи передаточная функция принимает форму, соответствующую аperiodическому звену первого порядка. В активных системах управления с использованием трёхосевых гироскопов, включая реализации, базирующиеся на. принципах динамической настройки гироскопа., ключевые параметры работы зависят от настроек внутренних цепей управления. При почти мгновенной реакции обратной связи (в условиях инерционной свободы) поведение системы может быть описано через передаточную функцию, аналогичную характеристике аperiodического звена. первого порядка. Это обеспечивает отсутствие колебаний во временном ответе, а достижение установившегося режима. происходит по экспоненциальному закону.

Таблица 1. Результаты расчета сдвига фаз по формуле (1)

п/п	Коэффициент затухания звена ξ	Безразмерная частота η	Фазовая погрешность $\Delta\varphi$, угл. мин.
1	0.6	0.000003	-0.012638
2	0.6	0.000030	-0.123645
3	0.6	0.000300	-12.37876
4	0.6	0.003000	-12.37644
5	0.6	0.030000	-123.8278

Фазовое смещение, свойственное рассматриваемому типу звена, определяется посредством аналитического соотношения, представленного в источнике [8]:

$$\Delta\varphi = -\arccrg(\zeta), \quad (1)$$

где ζ – безразмерная частота – отношение круговой частоты изменения угловой скорости к частоте изгиба асимптотической амплитудно-частотной характеристики звена. Результаты расчёта сдвига фаз представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчёта сдвига фаз

п/п	Безразмерная частота ζ	Фазовая погрешность $\Delta\varphi$, угл. мин.
1	0.000003	– 0.0103246
2	0.000030	– 0.1031493
3	0.000300	– 1.0313432
4	0.003000	– 10.313532
5	0.030000	– 103.10454

Анализ табличных данных выявил, что при определённых настройках измерительной системы погрешность определения угла ε_n , обусловленная фазовым сбоем, способна выходить за допустимые нормы. Проблема усугубляется при совместном воздействии динамических характеристик устройства и внешних условий, что приводит к заметному возрастанию фазового смещения.

Иллюстрация ситуации: если платформа вращается со скоростью $10^\circ/\text{с}$, а датчик угловой скорости на основе двухступенчатого гироскопа имеет собственную частоту 10 Гц, при коэффициенте затухания $\xi = 0,6$ относительный коэффициент системы составляет $n = 0,00278$. В этих условиях фазовая ошибка порождает отклонение величиной 11,46 угловых минут — значение, не соответствующее требованиям точности, особенно в задачах навигации и стабилизации, где критичны малейшие искажения положения объекта.

Следовательно, даже при умеренных динамических нагрузках влияние фазовых погрешностей оказывается существенным. Это подчёркивает необходимость аккуратного подбора параметров DUS и продуманной настройки демпфирующих характеристик.

Предлагается способ уменьшения воздействия фазовой ошибки [9] на итоговое определение угла ε_N . После получения первоначальных значений углов ε_1 и ε_2 при вращении платформы в прямом направлении необходимо изменить направление вращения на обратное и выполнить повторные замеры тех же параметров ε_1 и ε_2 . Индексы углов ε_1 и ε_2 снабжены надстрочными стрелками, которые указывают направление вращения платформы (направление изменения угла ε): стрелка вверх означает положительную производную, стрелка вниз — отрицательную. Далее рассчитываются значения углов и вычисляется их среднее арифметическое, которое принимается за искомое значение угла ε_N . Иллюстрация эффекта компенсации фазовой погрешности представлена на рисунке 3.

На рис. 3 изображено:

- кривая 1 – график, отражающий изменение сигнала датчика угловой скорости при отсутствии сдвига фаз;
- кривая 2 – график, отражающий изменение сигнала датчик угловой скорости при вращении платформы в положительном направлении при наличии сдвига фаз;
- кривая 3 – график, отражающий изменение сигнала датчика угловой скорости при вращении платформы в отрицательном направлении при наличии сдвига фаз.

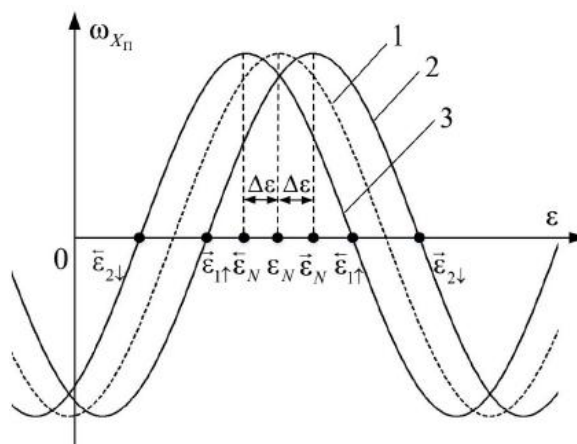


Рис. 3. Способ уменьшения влияния фазовой погрешности ДУС

При вращении платформы в положительном направлении, будем иметь:

$$\vec{\varepsilon}_N = \frac{\vec{\varepsilon}_{1\uparrow} + \vec{\varepsilon}_{2\downarrow}}{2}.$$

При вращении платформы в отрицательном направлении, будем иметь:

$$\vec{\varepsilon}_N = \frac{\vec{\varepsilon}_{1\uparrow} + \vec{\varepsilon}_{2\downarrow}}{2}.$$

Вычислив среднее значение углов, найдём:

$$\varepsilon_N = \frac{\vec{\varepsilon}_N + \vec{\varepsilon}_N}{2} = \frac{\vec{\varepsilon}_{1\uparrow} + \vec{\varepsilon}_{2\downarrow} + \vec{\varepsilon}_{1\uparrow} + \vec{\varepsilon}_{2\downarrow}}{4}.$$

Значение ε_N не зависит от запаздывания, вносимого ДУС.

Запаздывание в определении угла ε по показаниям энкодера. Работа измерительного прибора основана на фиксации текущего угла в тот момент, когда выходное напряжение аналогового датчика угловой скорости проходит через нулевой уровень [10, 11]. Синхронизация данного события осуществляется с помощью компаратора, один вход которого подключен к сигналу с панели управления, а второй — к опорному напряжению, равному нулю. Как только постоянный ток достигает нулевого значения, компаратор формирует импульс на выходе.

Данный импульс поступает в контроллер энкодера и выполняет функцию временной метки. Она применяется для извлечения и передачи на вычислительный модуль кода угла, соответствующего состоянию энкодера именно в этот момент. Благодаря этому измеряемый угол становится привязанным к нулевому уровню сигнала АСР. В цифровых системах типа DCS принцип остаётся неизменным: цифровой датчик оповещает об изменении знака сигнала (через установку бита-флага), что позволяет зафиксировать актуальный код угла.

Тем не менее, практическая точность такого подхода снижается вследствие нескольких причин. Во-первых, у каждого компаратора имеется пороговая чувствительность, из-за чего момент срабатывания может немного отличаться от истинного перехода сигнала через ноль. Во-вторых, цепь управления энкодером характеризуется собственным временем реакции, включающим внутренние задержки при формировании и передаче кода. Совокупность этих эффектов создаёт временной разрыв между реальным нулевым значением сигнала и моментом получения кода угла.

При условии, что данная задержка остаётся постоянной и не изменяется в зависимости от направления вращения или иных динамических характеристик системы, её воздействие при расчёте угла εN будет скомпенсировано. В такой ситуации задержка не вызовет систематической погрешности при определении угла εN , а лишь сместит время измерения на фиксированный интервал, что не отразится на итоговом результате расчётов.

Помехи (шум) в выходном сигнале ДУС. В реальных условиях каждый сигнал неизбежно сопровождается шумовыми компонентами, которые распределены по широкому частотному диапазону. Это явление обусловлено несколькими факторами: конструктивными особенностями устройств, определяющих угол поворота, механическими воздействиями на блок ориентации во время работы, а также уровнем и спецификой электромагнитных помех, воздействующих на элементы измерительной техники.

Рассмотрим пример датчика угловых скоростей (ДУС), основанного на вращающихся гироскопах. В этой конструкции низкочастотные шумы обычно возникают из-за внешних механических воздействий: колебаний, ударов и вибраций, которые могут быть вызваны работой подшипников ротора. Немаловажную роль также играют дисбаланс вращающихся элементов и технологические погрешности, допущенные при сборке. В результате этих причин в выходном сигнале появляются низкочастотные искажения, что осложняет определение момента, когда сигнал пересекает нуль, и, следовательно, снижает точность измерений. Что касается высокочастотных искажений, то они преимущественно носят электрический характер. На их формирование оказывают влияние электромагнитные помехи, собственные шумы электронных узлов ДУС, а также внешнее электромагнитное поле. Присутствие таких составляющих способно существенно исказить форму сигнала в зоне перехода через ноль, что негативно скажется на восприятии этого события. Благодаря хаотическому характеру шума, момент активизации компаратора, отвечающего за регистрацию нулевого уровня, оказывается неопределённым [12]. Вместо однозначной точки пересечения с осью времени, устройство реагирует на сигнал, флуктуирующий из-за наличия шумовых компонент. Это порождает погрешность $\Delta\varepsilon$, величина которой может варьироваться в пределах от положительной до отрицательной, в зависимости от текущего значения амплитуды и фазы шумовой составляющей в момент перехода через нуль.

На рисунке 4 проиллюстрирован случай появления погрешности $\Delta\varepsilon$ при наличии в выходном сигнале лишь одной высокочастотной гармонической помехи. На практике спектр помех значительно усложнён, что вызывает неупорядоченное изменение временного отклика компаратора. Для обеспечения высокой точности измерений требуется применение продвинутых алгоритмов фильтрации и анализа сигналов.

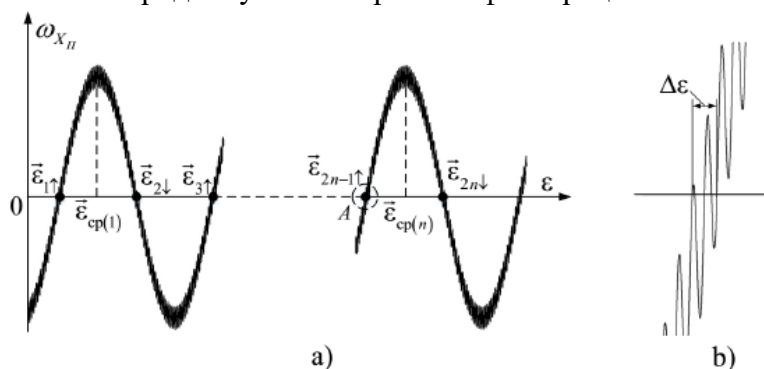


Рис. 4. График, отражающий изменение выходного сигнала ДУС при наличии помехи (а) и этот же график в увеличенном масштабе для диапазона угла ε вблизи точки А (б)

Представляя погрешность $\Delta\varepsilon$ как случайную переменную, распределённую по нормальному закону с нулевым средним значением, целесообразно использовать статистические процедуры для её минимизации. Подобный выбор обоснован тем, что разнонаправленные шумовые составляющие, воздействующие на компаратор, в результате множественных измерений взаимно компенсируются.

Для повышения достоверности измерения угла ε_N целесообразно использовать описанный ниже методический алгоритм. Вместо одного замера выходного сигнала и последующего расчёта все действия осуществляются в пределах установленного временного интервала. За это время платформа совершает n полных оборотов в прямом направлении, после чего — столько же оборотов в обратном. Подобный симметричный цикл вращения позволяет минимизировать влияние систематических погрешностей, обусловленных неоднородностью элементов привода или особенностями функционирования энкодера при смене направления движения. Обработка данных производится по результатам прохождения платформой n оборотов в каждом из двух направлений. При этом угол $\vec{\varepsilon}_{Ncp}$ вычисляется как среднее между углами $\vec{\varepsilon}_{Ni}$:

$$\vec{\varepsilon}_{Ncp} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{\varepsilon}_{Ni}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{\varepsilon}_{2i-1} + \vec{\varepsilon}_{2i}}{2n},$$

где n – число пар отсчётов (число оборотов платформы).

И угол $\bar{\varepsilon}_{Ncp}$ вычисляется как среднее между углами $\bar{\varepsilon}_{Ni}$:

$$\bar{\varepsilon}_{Ncp} = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\varepsilon}_{Ni}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\varepsilon}_{2i-1} + \bar{\varepsilon}_{2i}}{2n}.$$

Проведённый анализ позволяет записать итоговую формулу, вычисление по которой угла ε_N обеспечит наибольшую точность:

$$\varepsilon_N = \frac{\vec{\varepsilon}_{Ncp} + \bar{\varepsilon}_{Ncp}}{2} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{\varepsilon}_{2i-1} + \vec{\varepsilon}_{2i} + \bar{\varepsilon}_{2i-1} + \bar{\varepsilon}_{2i}}{4n}.$$

С ростом количества циклов измерений (n), применяемых для усреднения, влияние добавочного шума на точность определения азимутального угла снижается. Это обусловлено тем, что случайные погрешности, порождённые шумом, в процессе повторных измерений частично нейтрализуют друг друга. В результате общая ошибка, связанная со шумовым воздействием, убывает пропорционально обратной величине квадратного корня из числа измерений.

Последовательность действий по определению углов Ψ , Θ , Φ . Определение углов Эйлера–Крылова (Ψ , Θ , Φ), описывающих ориентацию блока относительно горизонтальной, географически привязанной системы координат, осуществляется последовательно по следующим этапам:

1. Ввод начальных геодезических параметров — задается географическая широта месторасположения блока (φ_0) и стандартный уровень ускорения свободного падения на экваторе (g_0). Эти данные используются для последующего точного моделирования локального гравитационного поля.

2. Вычисление локального ускорения свободного падения — на основе указанной широты с применением геодезических моделей рассчитывается реальное значение ускорения свободного падения (g) в данной точке. Найденное значение применяется для корректировки измерений, полученных от акселерометров.

3. Оценка углов наклона Θ и Φ — на основе показаний акселерометров и вычисленного значения g определяются углы продольного и поперечного наклона платформы, что позволяет установить её пространственную ориентацию относительно локальной вертикали.

4. Сбор данных при повороте в прямом направлении — производится последовательная фиксация n пар взаимосвязанных отсчётов во время вращения вокруг оси в заданном направлении.

5. Фиксация данных при обратном вращении — после окончания цикла в прямом направлении осуществляется изменение направления вращения, и снова регистрируется n пар выборок. Такой подход снижает влияние систематических погрешностей, обусловленных асимметрией динамики вращения.

6. Определение поправочного коэффициента eN . По результатам измерений вычисляется величина угла eN , способствующая повышению достоверности финального результата.

7. Нахождение начальных тригонометрических показателей. Рассчитываются значения $(\sin\Psi_1)$ и $(\cos\Psi_1)$, $(\sin\Psi_2)$ и $(\cos\Psi_2)$, служащие промежуточными оценками для угла Ψ .

8. Отбор соответствующей пары функций $\sin\Psi$ и $\cos\Psi$.

9. Установление окончательного значения азимута. Финальный подсчёт угла Ψ проводится с учётом расположения в нужном квадранте, гарантируя однозначное определение азимутального направления.

Выводы. Разработан и реализован способ оценки пространственного положения наземного измерительного комплекса, основанный на использовании гироскопа с адаптивной компенсацией параметров и акселерометров, обеспечивающий определение азимута и углов наклона даже во время вращения измерительного модуля.

Выявлены основные причины снижения достоверности ориентации, среди которых — несоответствие фазы в датчике угловой скорости, временные задержки при считывании информации от энкодера, а также наличие помех в выходных сигналах датчиков.

Показано, что фазовые неточности датчика угловой скорости в режимах движения могут вызывать существенную систематическую погрешность при определении направления условного Севера, что напрямую сказывается на точности расчета азимутального угла.

Для устранения этих эффектов предложена технология, основанная на циклическом вращении измерительной платформы в двух противоположных направлениях с последующим усреднением результатов. Такой подход эффективно снижает влияние динамических искажений.

Экспериментальные данные подтверждают высокую эффективность разработанного метода: достигнуто повышение точности определения углов наклона до нескольких угловых минут, а азимутального угла — до нескольких десятков угловых минут.

Предложенный подход может быть применён при проектировании и модернизации высокоточных навигационных и ориентационных систем для наземного применения, особенно в условиях недоступности внешних источников навигационной информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тан, С. Специализированное устройство контрольно-измерительного стенда для аттестации прецизионных гироскопов / С. Тан, В. П. Подчерзев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2016. – № 6(111). – С. 15-30.
2. Подчерзев, В. П. Компоненты модели погрешностей динамически настраиваемого гироскопа / В. П. Подчерзев, 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 гиросtabilizаторов" / В. А. Матвеев, В. П. Подчерзев, В. В. Фатеев ; В. А. Матвеев, В. П. Подчерзев, В. В. Фатеев ; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 103 с.
4. Подчерзев, В. П. Повышение динамической точности гироскопа с внутренним упругим карданным подвесом в режиме датчика угловой скорости / В. П. Подчерзев, 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. Подчерзев, В. П. Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilizаторе / В. П. Подчерзев, 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. Наумов, М. А. Методы и результаты экспериментальной оценки точности ориентации наземного прибора с использованием динамически настраиваемого гироскопа / М. А. Наумов, О. С. Волуева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 66-80. – DOI 10.5281/zenodo.18229754. – EDN CDWOXG.
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.
12. Солодовников, В. В. Теория автоматического управления техническими системами / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", 1993. – 492 с. – ISBN 5-7038-0331-4.

REFERENCES LIST

1. Tan, S. Spetsializirovannoe ustroystvo kontrolno-izmeritelnogo stenda dlia attestatsii pretsizionnykh giropriborov / S. Tan, V. P. Podchertzsev // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Serii Priborostroenie. – 2016. – № 6(111). – S. 15-30.
2. Podchertzsev, V. P. Komponenty modeli pogreshnostei dinamicheskii nastraivaemogo giroskopa / V. P. Podchertzsev, S. Tan, Ts. Tsin // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2015. – № 1. – S. 8-18.
3. Matveev, V. A. Girokopicheskie stabilizatory na dinamicheskii nastraivaemykh vibratsionnykh girokopakh : uchebnoe posobie po kursu Teorii girokopov i girostabilizatorov / V. A. Matveev, V. P. Podchertzsev, V. V. Fateev ; V. A. Matveev, V. P. Podchertzsev, V. V. Fateev ; Mosk. gos. tekhn. un-t im. N.E. Baumana. – Moskva: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2005. – 103 s.
4. Podchertzsev, V. P. Povyshenie dinamicheskoi tochnosti giroskopa s vnutrennim uprugim kardannym podvesom v rezhime datchika uglovoi skorosti / V. P. Podchertzsev, D. Z. Nguen // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Serii Priborostroenie. – 2021. – № 4(137). – S. 188-207. – DOI 10.18698/0236-3933-2021-4-188-207.
5. Podchertzsev, V. P. Modelirovanie kalibrovki dinamicheskii nastraivaemykh girokopov na odnoosnom girostabilizatore / V. P. Podchertzsev, Ts. Tsin // Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii. – 2017. – № 10(70). – S. 8. – DOI 10.18698/2308-6033-2017-10-1682.

6. Klimashov, B. M. Radiolokatsionnyi izmeritel malykh vysot dlia posadki letatelnykh apparatov / B. M. Klimashov // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2010. – № 11. – S. 27-32.
7. Lesnykh, I. V. Impulsnyi lazernyi dalnomer sverkhvysokoi tochnosti / I. V. Lesnykh // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziia i aerofotosiemka. – 2004. – № 3. – S. 127-130.
8. Mikhliaev, S. V. Pogreshnosti izmereniia lazernogo triangulatsionnogo dalnomera pri zondirovanii naklonnoi zerkalnoi poverkhnosti / S. V. Mikhliaev // Datchiki i sistemy. – 2007. – № 4. – S. 11-14.
9. Naumov, M. A. Metody i rezultaty eksperimentalnoi otsenki tochnosti orientatsii nazemnogo pribora s ispolzovaniem dinamicheski nastraivaemogo giroskopa / M. A. Naumov, O. S. Volueva // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 4. – S. 66-80. – DOI 10.5281/zenodo.18229754. – EDN CDWOXG.
10. Uriadov, D. A. Razrabotka ustroystv podderzhanii uglovoi skorosti povyshennoi tochnosti / D. A. Uriadov, V. V. Skotnikov // Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve. – 2015. – № 3(15). – S. 159-165.
11. Sedyshev, V. V. Upravlenie uglovym dvizheniem odnoosnogo ispytatelnogo stenda giroskopicheskikh sistem / V. V. Sedyshev, P. E. Belochkin // Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompiuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika. – 2014. – T. 14, № 4. – S. 42-50.
12. Solodovnikov, V. V. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia tekhnicheskimi sistemami / V. V. Solodovnikov, V. N. Plotnikov, A. V. Iakovlev. – Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana (natsionalnyi issledovatel'skii universitet), 1993. – 492 s. – ISBN 5-7038-0331-4.

Поступила в редакцию 09.12.2025 г., рекомендована к изданию 10.02.2026 г.

IMPROVING THE ACCURACY OF LAND-BASED INSTRUMENTS BASED ON A DYNAMICALLY ADJUSTED GYROSCOPE

Naumov M.A., Volueva O. S.

The article presents methods and results of experimental evaluation of the accuracy of determining the spatial orientation of a ground-based measuring device based on a dynamically tuned gyroscope and accelerometers. Algorithms for calculating the Euler–Krylov orientation angles, including the azimuth angle and tilt angles, are considered. The main sources of errors related to the phase shift of the angular velocity sensor, encoder readout delays, and the noise component of the output signal are analyzed. A method for compensating the phase error based on rotating the platform in opposite directions and averaging the results is proposed. The effectiveness of the proposed approach and the increase in the accuracy of orientation determination have been experimentally confirmed.

Keywords: gyroscope, angular velocity sensor, accelerometer, orientation, azimuth, Euler–Krylov angles, measuring platform, measurement error; navigation systems.

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 автоматизации 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 at 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.
ORCID: 0009-0001-4592-5328

Волюева Ольга Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации 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.
ORCID: 0000-0002-0289-3047

РАЗРАБОТКА ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ФРАГМЕНТАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© 2026 *Решетников К.И., Ронкин М.В.*

В работе представлена разработка проблемно-ориентированного программного комплекса для оценки фрагментации горных пород в реальном времени на основе нейронной модели YOLOv11 OBB. Для повышения робастности и преодоления дефицита обучающих данных использован конвейер генерации синтетических изображений на базе Stable Diffusion XL Turbo с последующей автоматической разметкой Mask R-CNN и ручной фильтрацией. В работе разработан алгоритм оценки фрагментации на базе модели обнаружения объектов с ориентированными обрамляющими рамками YOLO-OBB. Апробация алгоритма на видеопотоке выгрузки горной массы внутрь приемного бункера показала производительность до 3,21 FPS на CPU (в формате ONNX), что подтверждает применимость решения в реальных условиях горного производства.

Ключевые слова: фрагментация горных пород, синтетические данные, Stable Diffusion, автоматизированный контроль, компьютерное зрение.

Введение. Добыча полезных ископаемых открытым способом в карьере является наиболее распространённым методом разработки месторождений. Процесс разработки является сложным технологическим процессом, включающим множество этапов. Он начинается с последовательного вскрытия месторождения, которое осуществляется с учётом геолого-структурных особенностей месторождения. Горные работы включают бурение скважин, зарядание скважин взрывчатыми веществами, проведение взрывных работ (БВР), экскавацию (погрузку) и транспортировку извлечённой руды с использованием специализированной карьерной техники [1]. Далее горная масса направляется на переработку на горно-обогатительный комбинат (ГОК). На горно-обогатительном комбинате выполняется комплекс технологических операций, направленных на отделение и извлечение полезного минерала из исходной горной массы. На первых этапах осуществляется многоступенчатое дробление и грохочение (сортировка) до требуемого фракционного состава. Затем проводится обогащение с применением физико-химических методов в зависимости от типа полезного ископаемого [2]. На рис.1. показана общая схема добычи полезных ископаемых начиная с карьера до горно-обогатительного комбината [3]. В современном горно-обогатительном производстве качество фрагментации – то есть количественная оценка размеров и распределения фрагментов горной массы после взрывных работ или дробления является одним из ключевых факторов эффективности. Оптимальная фрагментация способствует повышению производительности дробильно-обогатительного оборудования, снижению энергозатрат и износа техники, а также улучшению показателей извлечения ценного компонента на стадии обогащения [4, 5]. Для непрерывного контроля на всех стадиях переработки горной продукции оценка фрагментации может выполняться на следующих этапах. Во-первых, оценка фрагментации в условиях открытого карьера после проведения взрывных работ необходима для: контроля качества взрывных работ, сопоставления фактических результатов взрыва с проектными параметрами БВР; определения оптимального фракционного состава горной массы, обеспечивающего максимальную эффективность

последующего дробления; выявления негабаритных фрагментов, требующих вторичного дробления. Во-вторых, оценка фрагментации при выгрузке горной массы с горных самосвалов в приемных бункер горно-обогатительного предприятия позволяет:

- получить обратную связь от параметров буровзрывных работ. А именно, сопоставить фрагментацию на входе в бункер с паспортами взрывов, таким образом оптимизировать сетку скважин, заряды и инициирование, перераспределяя энергию между взрывом и дроблением (Mine-to-Mill подход) [6].

- использовать системы контроля фрагментации над приёмными бункерами и конвейерами. Это обеспечивает непрерывный мониторинг фрагментации в реальном времени, что повышает качество оперативного управления и позволяет напрямую привязывать экономический эффект к изменениям настроек БВР и дробления.

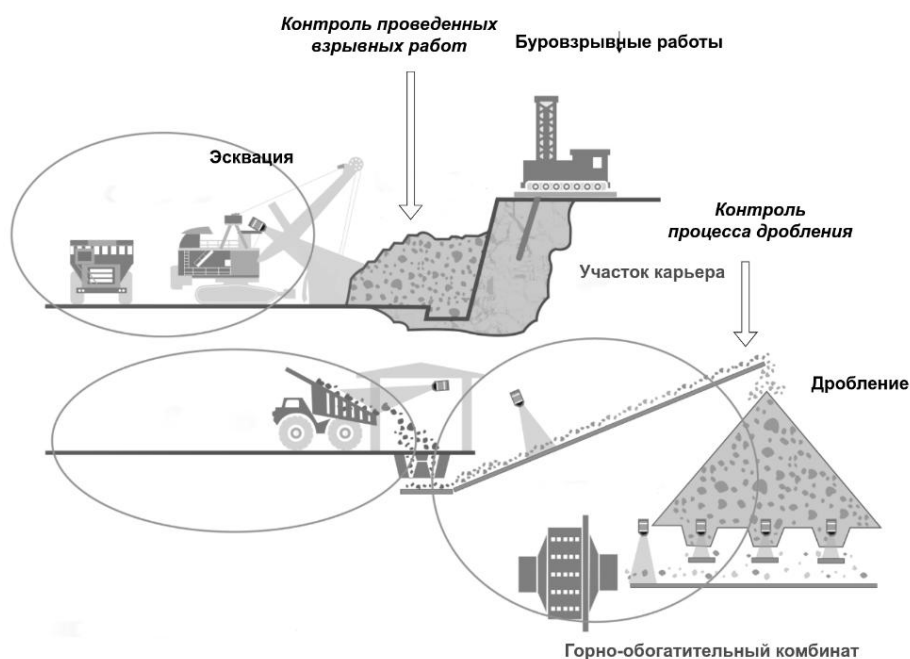


Рис. 1. Технологическая цепочка добычи и обогащения полезных ископаемых: от карьера до ГОКа

Оценка фрагментации на конвейерных лентах в режиме реального времени позволяет оперативно контролировать гранулометрический состав потока руды, исключая выборочный отбор проб и снижая выборочный сдвиг. Это повышает достоверность данных о реальном распределении размеров фрагментов в потоке конвейера. Кроме того, оценка фрагментации в реальном режиме времени позволяет автоматически корректировать режимы дробления и измельчения (нагрузку на дробилки, подачу на мельницы, настройки АСУ ТП) на основе текущего размера фрагментов, снижая энергопотребление и износ оборудования и повышая стабильность работы горно-обогатительного комплекса [7].

Таким образом, для современного горнодобывающего комплекса оперативное управление технологическими процессами на основе автоматизированных методов анализа фрагментации становится критически важным. Известно, что применение автоматизированных систем оценки качества взрывных работ и фрагментации горных пород приводит к повышению производительности на 10–15%, сокращению аварийности и повреждений оборудования на 20–30%, а также уменьшению перерасхода взрывчатых веществ на 5–10% благодаря оптимизации параметров взрывов [8-10].

Эти показатели демонстрируют высокую значимость внедрения инновационных решений, позволяющих не только повысить экономическую отдачу, но и улучшить безопасность производственных процессов.

Особенно перспективным направлением является интеграция таких систем в рамках концепции Mine-to-Mill – сквозного подхода к оптимизации всего технологического цикла: от параметров буровзрывных работ в карьере до режимов измельчения и обогащения на ГОК. Mine-to-Mill предполагает передачу данных о фрагментации, влажности, прочности и других ключевых характеристиках горной массы в реальном времени на все последующие стадии переработки [6, 7]. Это позволяет динамически корректировать режимы дробления, подачи руды и даже дозировки реагентов на флотацию, обеспечивая максимальное извлечение полезного компонента при минимальных энергозатратах.

Задача оценки фрагментации. В современном горном производстве оценка фрагментации выполняется с помощью методов компьютерного зрения. Общая схема оценки фрагментации горных пород по изображению включает: получение цифрового изображения с предварительной обработкой, сегментацию контуров фрагментов пород на изображении, вычисление параметров фрагментов, масштабирование параметров объектов, получение статистического распределения [4]. Сегодня одним из наиболее популярных способов решения задачи оценки распределения фрагментов горной породы на изображении являются нейронные сети [10]. Подходы на основе нейронных сетей обладают рядом преимуществ: способностью обрабатывать изображения с высокой плотностью фрагментов, устойчивостью к изменениям масштаба и ракурса съёмки, робастностью к вариациям внешних условий – освещённости, времени суток, запылённости, наличию бликов и искажений [11].

В современной научной литературе представлены различные подходы к реализации систем компьютерного зрения, включая методы выделения границ (boundary detection), экземплярную сегментацию (instance segmentation) и алгоритмы обнаружения объектов (object detection) [12, 13]. Среди перечисленных методов наиболее широкое распространение получил подход, основанный на экземплярной сегментации [14, 15]. Однако данный метод характеризуется значительными вычислительными затратами, что ограничивает его применение в реальных условиях. В предыдущей работе авторов было показано, что модели YOLO восьмой версии в режиме обнаружения ориентированных обрамляющих рамок способны решать задачи оценки фрагментации с точностью, сопоставимой с моделями Mask R-CNN, но с гораздо большей скоростью – приблизительно в 10 раз быстрее. Модели типа Foundation Models, например Segment Anything Model (SAM), также позволяют решать задачу оценки фрагментации на изображениях [16, 17]. Однако их применение требует ручной корректировки разметки для исключения лишних сегментов. Кроме того, модель SAM характеризуется значительным количеством параметров, что исключает её применение в режиме реального времени и затрудняет развёртывание на портативных устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

В последние годы подходы на основе обнаружения объектов с помощью одностадийных детекторов (YOLO, SSD) находят всё большее применение в горном деле благодаря высокой скорости обработки для обработки в реальном времени. Методы, использующие ограничивающие рамки (bounding boxes), позволяют эффективно оценивать количество и пространственное распределение фрагментов. Однако они обладают существенным ограничением: игнорируя форму и ориентацию объектов, такие методы демонстрируют повышенную погрешность при оценке

реальных линейных размеров, особенно для продолговатых или частично перекрывающихся фрагментов. Перспективным направлением исследований является использование детекторов с ориентированными ограничивающими рамками (oriented bounding box), таких как YOLO OBB, RTMDet-OBB. Они позволяют учитывать угол наклона фрагментов и тем самым значительно снизить ошибку оценки линейных размеров – при этом сохраняя высокую производительность и совместимость с edge-устройствами. Такой подход обеспечивает компромисс между точностью геометрического анализа и вычислительной эффективностью, что особенно важно для задач оперативного контроля в рамках концепции Mine-to-Mill. В таблице 1 представлено сравнение современных методов компьютерного зрения для оценки фрагментации по следующим ключевым критериям: вычислительная сложность (GFLOPs), требуемый объём видеопамати (VRAM), способность обрабатывать изображения с широким полем зрения, возможность развёртывания на портативных edge-устройствах. Сравнительный анализ показывает, что методы на основе YOLO с ориентированными ограничивающими рамками обеспечивают оптимальный баланс между качеством оценки фрагментации и вычислительной эффективностью для работы в реальном времени.

Таблица 1. Сравнение подходов компьютерного зрения для решения задачи оценки фрагментации

Метод	Обработка изображений с широким охватом	Качество оценки фрагментации	GFLOPs	Количество VRAM	Запуск на портативных устройствах
Классический алгоритм водораздела (Watershed)	Нет	Низкое	<0.1	<1Гб	Да
Экземплярная сегментации (Mask-RCNN)	Да	Высокое	134 (Mask R CNN+Resnet50)	~4-6Гб	Ограничено
Выделение контуров объектов (Unet)	Да	Высокое	66 (Unet Resnet50)	3-4Гб	Да
Методы обнаружения объектов (YOLO)	Да	Среднее	34 (YOLOv11m) 98 (YOLOv11x)	<3Гб	Да
Методы обнаружения ориентированных ограничивающих рамок (YOLO OBB)	Да	Высокое	36 (YOLOv11m) 102 (YOLOv11x)	<3Гб	Да
Foundation model (SAM)	Да	Высокое	488	8-10Гб	Нет

Другим существенным ограничением применения нейронных сетей в горном деле является недостаток репрезентативных обучающих данных, что усугубляется высокой вариативностью условий: сменой месторождений, сезонными изменениями освещённости и влажности. В результате модели, обученные на данных с одного карьера или в определённый период, часто сталкиваются с дрейфом данных (data drift) при переносе в новые условия – что приводит к снижению точности сегментации/детекции и потере устойчивости оценки фрагментации [18].

Таким образом, современные методы компьютерного зрения демонстрируют высокую точность при решении задачи оценки фрагментации горных пород. Однако их вычислительная сложность зачастую оказывается чрезмерной для применения в режиме реального времени, что ограничивает их использование в системах

мониторинга технологических процессов горного производства. Дополнительную сложность представляет проблема дрейфа данных. Модели, обученные на изображениях с одного карьера, часто теряют точность при переносе на другие карьеры или даже при изменении внешних условий на том же участке, таких как время года, погодные условия или вариации освещения. С другой стороны, современные одностадийные детекторы объектов способны работать в реальном времени, но страдают от недостаточной точности измерений, особенно при оценке геометрических характеристик фрагментов.

В связи с этим основная гипотеза настоящей работы заключается в применении нейронных сетей для обнаружения объектов с использованием ориентированных ограничивающих рамок, дополненное включением синтетических изображений для расширения обучающей выборки. Использование такого подхода позволит повысить устойчивость модели к дрейфу данных и достичь баланса между точностью оценки фрагментации и вычислительной эффективностью, достаточной для работы в реальном времени. Цель данной работы является разработка проблемно-ориентированного программного комплекса, обеспечивающего автоматизированную оценку фрагментации горных пород в режиме реального времени на промышленных объектах с использованием нейросетевой модели обнаружения с ориентированными ограничивающими рамками (YOLOv11 OBB), устойчивой к дрейфу данных за счёт дополнения обучающей выборки синтетическими изображениями.

Разработка проблемно-ориентированного алгоритмического обеспечения. В данной работе предлагается разработка проблемно-ориентированного алгоритмического обеспечения, позволяющего выполнять оценку фрагментации горной массы в режиме реального времени. Для повышения робастности и обобщающей способности нейросетевых моделей предлагается использовать сгенерированные синтетические изображения, расширяющие представительность обучающей выборки за счёт разнообразия геологических, погодных и техногенных условий. Основные ключевые функциональные требования к системе оценки фрагментации горных пород в режиме реального времени следующие:

1. Анализ фрагментации гранулометрического состава горной массы, перемещаемой по конвейерной ленте, в режиме реального времени.
2. Выполняет обнаружение фрагментов горных пород негабаритного размера.
3. Включает возможность визуализации результатов обнаружения негабаритных фрагментов и формирование оповещения во внешние системы.
4. Включает алгоритмы настройки и обучения моделей нейронных сетей для обнаружения фрагментов горных пород на изображении.
5. Включает возможность конвертации форматов разметки для задач сегментации, обнаружения обрамляющих рамок, обнаружения ориентированных обрамляющих рамок.
6. Включает возможность интеграции с промышленными цифровыми системами (MES, SCADA, ERP) – автоматическая отправка данных на сервер.
7. Обеспечивает стойкость к сложным световым условиям, загрязнению, перекрытию и вариабельности ракурса съемки за счет применения робастных алгоритмов нейронных сетей.

С учётом функциональных требований структура проблемно-ориентированного программного комплекса для оценки фрагментации представлена на рис. 2. Программный комплекс реализован по модульной слабосвязанной архитектуре, что

обеспечивает гибкость настройки, масштабируемость и простоту интеграции в существующую инфраструктуру горно-обогатительного предприятия. В его состав входят следующие модули:

- модуль обработки и анализа изображений;
- модуль конвертации разметки;
- модуль генерации синтетических изображений;
- модуль работы с источниками изображений;
- модуль взаимодействия с базой данных;
- модуль взаимодействия с внешними системами;
- пользовательский интерфейс.

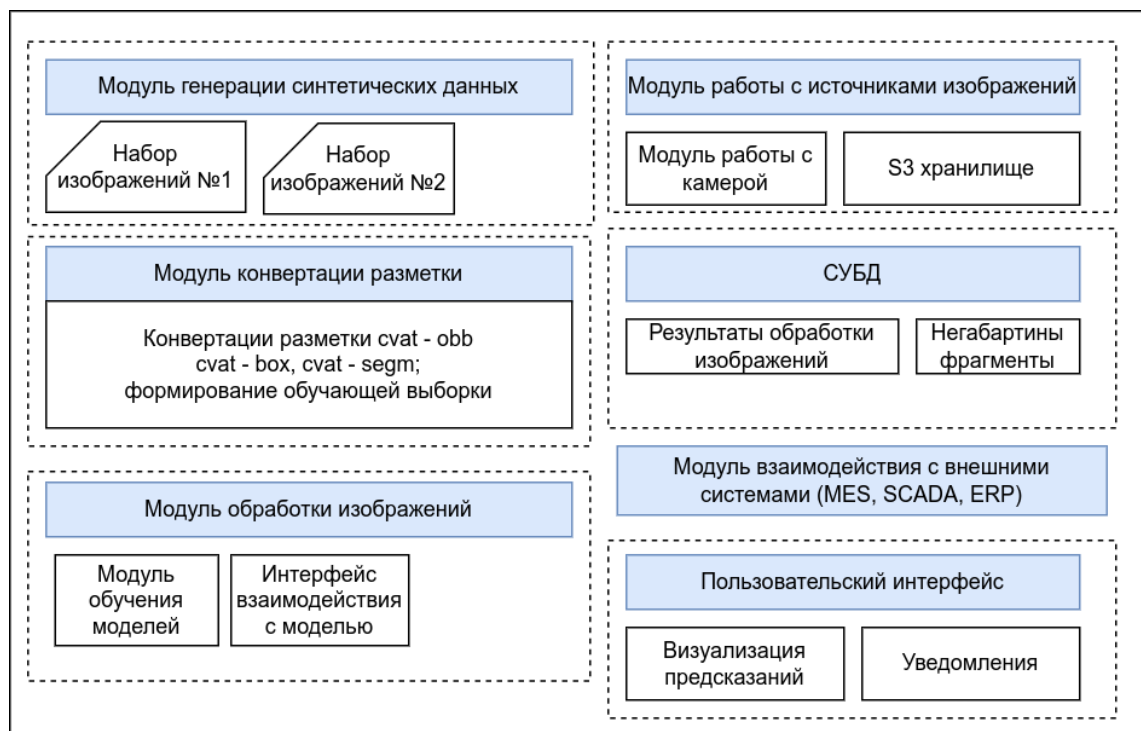


Рис. 2. Обобщенная структура программного комплекса

Модуль обработки и анализа изображений. Данный модуль является центральным компонентом программного комплекса и предназначен для автоматической оценки фрагментации горных пород по цифровым изображениям, полученным с промышленных камер или внешних источников данных. Основная функция модуля – обнаружение отдельных фрагментов пород на изображении и последующая количественная оценка их геометрических размеров. Модуль обеспечивает следующие ключевые возможности:

- обучение и интерфейс моделей обнаружения, совместимых с форматом разметки, сформированной модулем конвертации разметки;
- унифицированный программный интерфейс (API) для передачи результатов обработки в модуль графического интерфейса (визуализация детекций, интерактивная коррекция) и в модуль интеграции с внешними системами.

В соответствии с требованиями к обработке в режиме реального времени, реализован алгоритм оценки фрагментации на базе модели обнаружения объектов с ориентированными обрамляющими рамками YOLO-OBV. Блок-схема алгоритма для оценки размера фрагментов на изображении показана рис. 3.

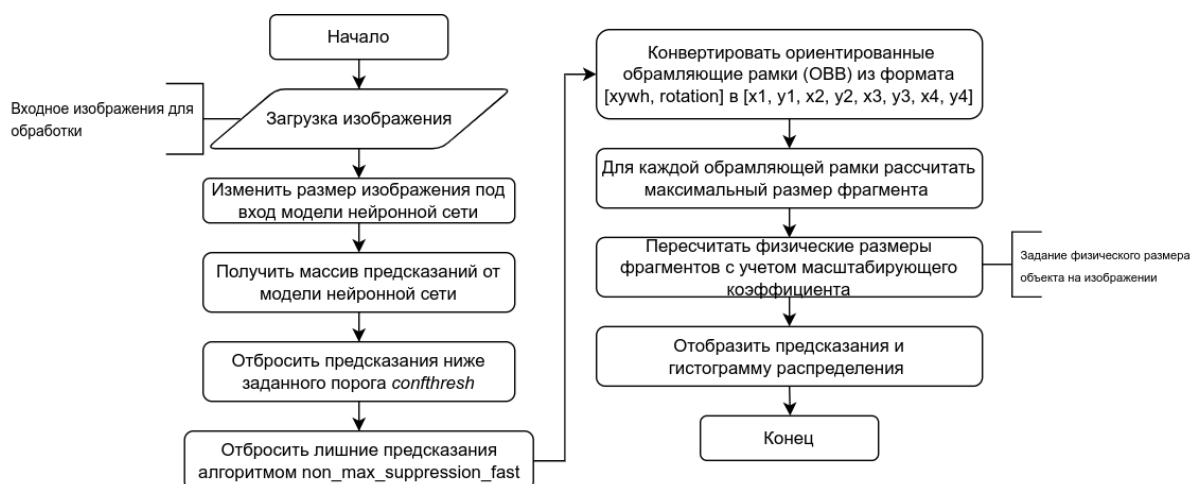


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки фрагментации на изображении с помощью нейронной сети обнаружения ориентированных обрамляющих рамок YOLO-OBV

Алгоритм включает следующую последовательность действий:

1. Получение входного изображения. Изображение поступает от модуля взаимодействия с камерой или внешнего API.
 2. Предварительная обработка. Изображение нормализуется и преобразовывается до входного разрешения модели нейронной сети.
 3. Выполняется предсказание (inference) с помощью модели. Выход модели содержит набор предсказанных ориентированных обрамляющих рамок с атрибутами: координаты центра (x, y) , ширина w , высота h , угол поворота θ , классовая метка и уровень достоверности (confidence score).
 4. Постобработка предсказаний. Выполняется фильтрация обрамляющих рамок ниже порога достоверности $\text{confidence score} < p_{\min}$. Порог p_{\min} задается в пределах 0,2-0,5.
 5. Применение алгоритма подавления немаксимумов (Non-Maximum Suppression, NMS). Параметр IoU (Intersection over Union) установлен равным 0,5.
 6. Конвертация формата ориентированных обрамляющих рамок. Каждая рамка OBV в формате $[x, y, w, h, \theta]$ преобразуется в набор координат угловых точек $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4]$.
 7. Метрическая калибровка. На основе известных физических размеров сцены, заданных для конфигурации камеры: (масштаб пиксель/мм, расстояние до ленты) выполняется пересчёт пиксельных координат в физические единицы.
 8. Анализ фрагментации. Для каждого фрагмента вычисляется максимальный размер фрагмента из габаритов ориентированной обрамляющей рамки $s = \max(h, w)$.
- Результат обработки изображения сохраняется в базу данных.

Модуль генерации синтетических данных. Модуль предназначен для расширения обучающей выборки за счет генерации изображений с помощью подхода на основе диффузионной модели. Модуль реализует text-to-image подход на основе диффузионной модели Stable Diffusion XL Turbo, доступной в хранилище моделей Hugging Face [19]. Управляемость генерации синтетических изображений достигается за счет параметризованных текстовых описаний (prompts), каждое из которых кодирует комбинацию следующих признаков: тип горной породы (уголь, гранит, железная руда), дистанция до объекта (10–15 м), тип съёмки (пейзажный/крупный план), освещение и фон (ясное небо, пересечённая местность).

В текущей реализации используется фиксированный набор из десяти текстовых описаний для генерации изображений, представленных в таблице 2.

Таблица 2. Набор текстовых описаний, используемых в модуле генерации синтетических изображений

1	Photograph of a coal pit with numerous rocks located 10-15 meters from the camera, against a clear blue sky (Фотография угольного карьера с многочисленными камнями, расположенной в 10-15 метрах от камеры, на фоне ясного голубого неба)
2	Photograph of a granite quarry with numerous rocks located 10-15 meters from the camera, against a clear blue sky (Фотография гранитного карьера с многочисленными камнями, расположенного в 10-15 метрах от камеры, на фоне ясного голубого неба)
3	Photograph of an iron ore quarry with numerous rocks located 10-15 meters from the camera, against a clear blue sky (Фотография железорудного карьера с многочисленными фрагментами, расположенного в 10-15 метрах от камеры, на фоне ясного голубого неба)
4	A quarry landscape image of a coal pit with large scattered stones located 10-15 meters in front of the photographer (Изображение пейзажа карьера, изображающего угольную яму с крупными разбросанными камнями, расположенную в 10-15 метрах перед фотографом)
5	A quarry landscape image a granite quarry with large scattered stones located 10-15 meters in front of the photographer (Изображение пейзажа карьера гранитный карьер с разбросанными крупными камнями, расположенный в 10-15 метрах перед фотографом)
6	A quarry landscape image of an iron ore quarry with large scattered stones located 10-15 meters in front of the photographer (Пейзажное изображение карьера по добыче железной руды с крупными разбросанными камнями, расположенное в 10-15 метрах перед фотографом)
7	Close-up shot of a coal quarry focusing on various stones located 10-15 meters from the lens, surrounded by rough terrain (Крупный план угольного карьера с фокусировкой на различных камнях, расположенных в 10-15 метрах от объектива, в окружении пересеченной местности)
8	Close-up shot of a granite quarry focusing on various stones located 10-15 meters from the lens, surrounded by rough terrain (Крупный план гранитного карьера с фокусировкой на различных камнях, расположенных в 10-15 метрах от объектива, в окружении пересеченной местности)
9	Close-up shot of an iron ore quarry focusing on various stones located 10-15 meters from the lens, surrounded by rough terrain (Крупный план карьера по добыче железной руды с фокусировкой на различных камнях, расположенных в 10-15 метрах от объектива, на неровной местности)
10	Open pits workplace rock chunks after blasting, large scale, zoom rock, big rocks, located 10-15 meters in front of the photographer (Открытые карьеры с каменными глыбами после взрывных работ, крупный масштаб, масштабирование камня, большие камни, расположенные в 10-15 метрах перед фотографом)

Для генерации используется модель "stabilityai/sdxl-turbo" из библиотеки Hugging Face. Модуль генерации синтетических данных реализует алгоритм получения набора фотореалистичных изображений, представленный в виде блок-схемы на рис. 4. Формируется фиксированный список из 10 текстовых описаний (prompts).

Для выбранного prompts (p) генерируется N изображений с помощью диффузионной модели. После полученные изображения вручную отбираются с целью фильтрации изображений с артефактами и обеспечения визуальной достоверности. Примеры сгенерированных изображений фрагментации горных пород моделью Stable Diffusion XL Turbo представлены на рис. 5. Для отфильтрованных изображений выполняется автоматическая разметка с помощью предобученной модели Mask R-CNN (X-101-32x8d FPN 3x). на наборе фрагментации горных пород. Полученные аннотации объединяются в единый файл в формате COCO. Далее полученный синтетический набор данных объединяется с имеющимся набором данных и выполняется обучение модели.

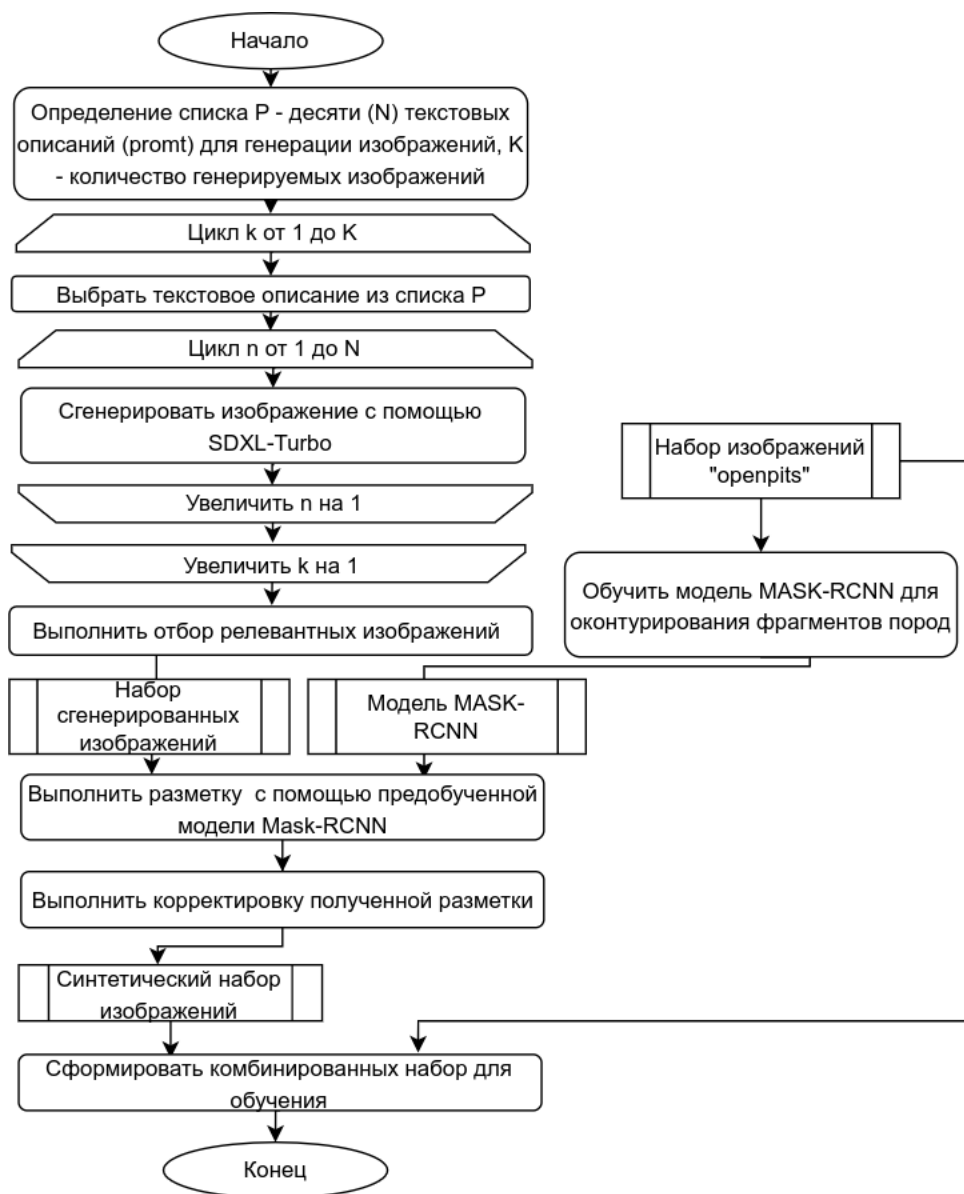


Рис. 4. Блок-схема алгоритма генерации фотореалистических изображений



Рис. 5. Примеры изображений фрагментации горных пород, сегментированные моделью Stable Diffusion XL Turbo

Модуль конвертации разметки. Модуль предназначен для преобразования аннотаций размеченных данных в форматы, совместимые с архитектурой YOLO, позволяя формировать обучающих набор в форматах: BOX – обнаружение обрамляющих рамок, OBB – обнаружение ориентированных обрамляющих рамок, SEGM – экземплярная сегментации объектов. Модуль конвертации работает со следующими форматами:

- из COCO (Common Objects in Context) в YOLO (BOX) - обрамляющие рамки в формате $[x, y, w, h, \theta]$;
- из COCO в YOLO (OBB) - ориентированные обрамляющие рамки в формате $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4]$;
- из COCO в YOLO (SEGM) - преобразование полигонов экземплярной сегментации в формат YOLO, при котором каждый объект представляется списком нормализованных координат вершин $[x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]$.

Рассмотрим реализованный алгоритм конвертации из COCO в YOLO (OBB). В рамках стандарта разметки COCO каждый объект сегментации представлен полигональной разметкой в виде плоского списка координат вершин $[x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]$, где $\{x_i, y_i\}$ координаты вершин полигона в пиксельных единицах, отсчитываемых от верхнего левого угла изображения (ось x направлена вправо, ось y вниз), n – количество вершин. Алгоритм нахождения координат ориентированной обрамляющей рамки включает следующие шаги:

1. Определение максимальной хорды. Нахождение координат максимально отстающих точек внутри полигона контура фрагмента породы. Для эффективного вычисления данной пары в реализации используется матричный подход, основанный на векторизованных операциях над массивами координат. Для этого строится матрица попарных разностей координат по осям x и y . На основе этих разностей вычисляется матрица квадратов евклидовых расстояний:

$$D = (\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2,$$

где каждый элемент $D[i, j]$ представляет собой квадрат расстояния между i -й и j -й вершинами контура. Среди вершин определяют координаты $A = (x_A, y_A)$ и $B = (x_B, y_B)$, задающие концы максимальной хорды, которая определяет угол наклона для ориентированной обрамляющей рамки. Уравнение прямой, проходящей через них, обозначим как: $Ax + By + C = 0$.

2. Поиск экстремальных точек по нормали от максимальной хорды. Для каждой вершины контура вычисляется её знаковое расстояние до прямой, проходящей через концы максимальной хорды AB . Данное расстояние определяется как длина перпендикуляра, опущенного из текущей точки $P(x, y)$ на прямую AB , с учётом знака, указывающего, по какую сторону от прямой расположена точка. Среди точек каждой полуплоскости выбираются те, у которых модуль расстояния до прямой AB максимален. Положение точек C и D , отмеченных на рис. 6 обозначим как:

$$C = (x_C, y_C); D = (x_D, y_D).$$

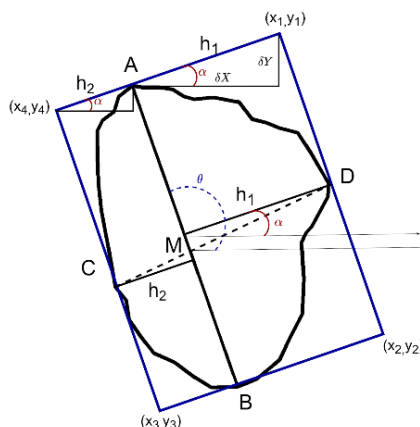


Рис. 6. Схема построения ориентированной обрамляющей рамки

3. Определение угла наклона ориентированной обрамляющей рамки. Вычисляется точка пересечения $M = (x_m, y_m)$ прямых AB и CD . Строится вектор $\vec{n} = MA$ задающий направление опорной оси. Далее вычисляется угол θ между \vec{n} и горизонтальной осью (вектор $(1,0)$). Угол ориентации ориентированной обрамляющей рамки определяется как:

$$\begin{cases} \alpha = \pi/2 + \theta, \text{ если } y_A < y_m \\ \alpha = \pi/2 - \theta, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Построение четырех вершин ориентированной обрамляющей рамки. На основании расстояний h_1 и h_2 от точек C, D до оси AB , а также угла α вычисляются смещения вдоль осей:

$$\begin{aligned} \delta x_1 &= h_1 \cos(\alpha), \\ \delta y_1 &= h_1 \sin(\alpha), \\ \delta x_2 &= h_2 \cos(\alpha), \\ \delta y_2 &= h_2 \sin(\alpha). \end{aligned}$$

Координаты вершин ориентированной обрамляющей рамки вычисляются как:

$$\begin{aligned} \delta x_1 &= h_1 \cos(\alpha), \\ \delta y_1 &= h_1 \sin(\alpha), \\ \delta x_2 &= h_2 \cos(\alpha), \\ \delta y_2 &= h_2 \sin(\alpha). \\ x_1 &= x_A + \delta x_1, \\ y_1 &= y_A - \delta y_1, \\ x_2 &= x_B + \delta x_1, \\ y_2 &= y_B - \delta y_1, \\ x_3 &= x_B - \delta x_2, \\ y_3 &= y_B + \delta y_2, \\ x_4 &= x_A - \delta x_2, \\ y_4 &= y_A + \delta y_2. \end{aligned}$$

Апробация программного обеспечения. Апробация программного комплекса выполнена на видеопотоке, полученном в условиях действующего горно-обогатительного предприятия. В качестве тестового сценария выбрана операция выгрузки горной массы из железнодорожного вагона во внутренний приемный бункер шахты. В тестовом сценарии был получен видеопоток на камеру телефона с параметрами видеокadra: кодек H.264 AVC, ширина 1920, высота 1080.

Обработка изображения для оценки фрагментации и определения негабаритных фрагментов выполнена с помощью нейронной сети YOLOv11l (OBB). Модель была обучена на наборе данных изображений фрагментации горных пород в открытом горном карьере с добавлением синтетических данных [20]. Далее была произведена тонкая настройка (fine-tuning) модели на целевом сценарии. Для этого было использовано 25 кадров, выделенных случайным образом из видеопотока выгрузки в разрешении 1400 на 880 пикселей. Тонкая настройка была выполнена за 20 эпох с использованием AdamW при этом были заморожены 14 из 23 слоев архитектуры сети. Обучению подвергались только веса последних C3k2-блоков в шее сети и параметры головного слоя, ответственного за регрессию ориентированных обрамляющих рамок.

Результаты применения модели показаны далее. На рис. 7а–г представлена последовательность кадров, зафиксировавших процесс выгрузки горной массы из железнодорожного вагона во внутренний приёмный бункер шахты. Рис. 7а–г иллюстрирует применение ориентированных обрамляющих рамок (OBB) для оценки фрагментации фрагментов горных пород.

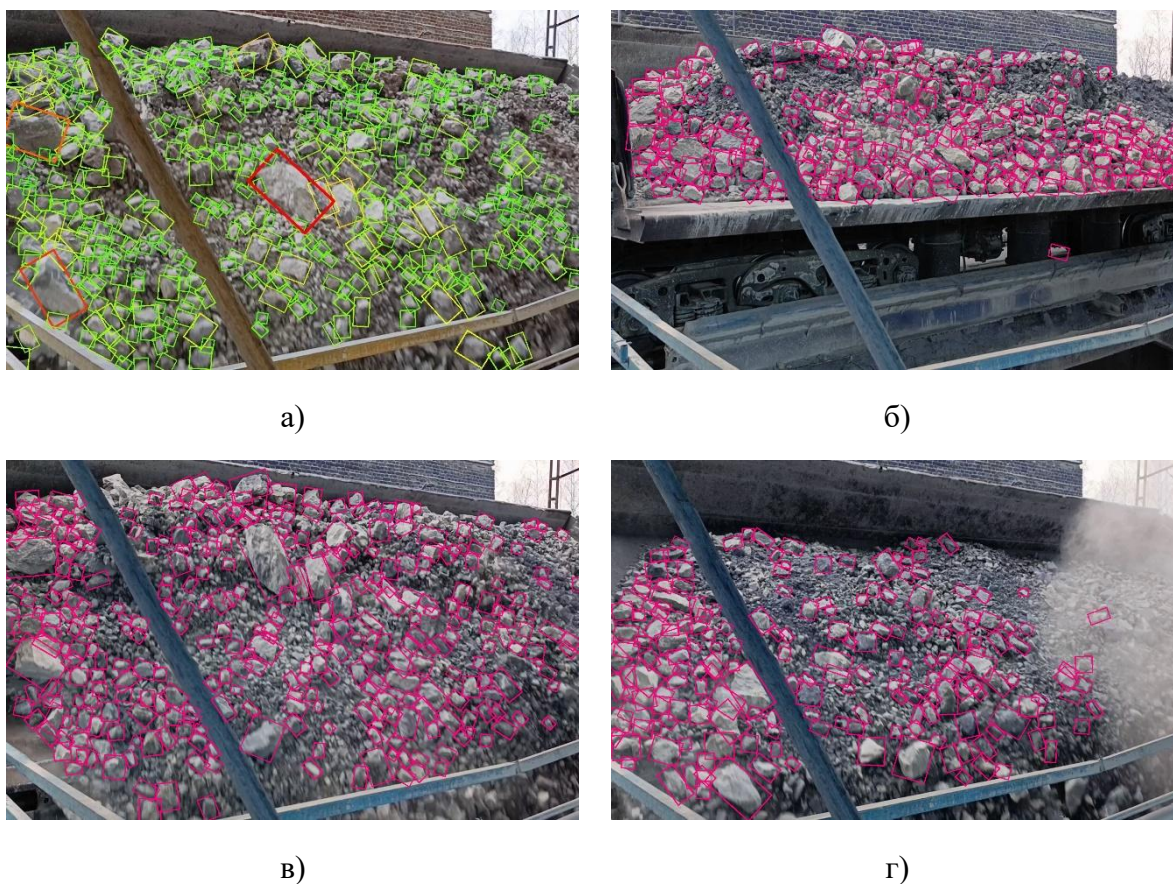


Рис. 7. Результаты обработки изображений выгрузки горных пород внутрь приемного бункера:
а) фрагменты крупных размеров выделены наиболее интенсивным оттенком красного цвета;
б-г) результаты обработки изображений с помощью ориентированных обрамляющих рамок

Минимально детектируемый размер фрагмента составил 8,71 пикселя, что при известном масштабе сцены (коэффициент калибровки $k = 16,07$ мм/ пиксель) соответствует размеру в 13,97 см. Временные характеристики работы программного комплекса оценены на платформе с процессором 11th Gen Intel® Core™ i5-11400H@2,70 ГГц. Зависимость времени обработки одного кадра от входного разрешения представлена в таблице 3. При разрешении 640x640 пикселей обеспечивается производительность 2,57 FPS, что позволяет выполнение мониторинга технологического процесса в реальном режиме времени. Конвертация модели в формат ONNX позволяет ускорить скорость обработки кадров до 3,21 FPS.

Таблица 3. Зависимость времени обработки от размера входного разрешения

Разрешение	Pytorch		ONNX	
	Время обработки, с	FPS	Время обработки, с	FPS
224	0,084	11,9	0,064	15,62
420	0,186	5,37	0,171	5,84
640	0,389	2,57	0,311	3,21
1280	1,999	0,50	1,89	0,53

Выводы. В данной работе был разработан проблемно-ориентированный программный комплекс, предназначенный для оценки фрагментации горных пород в режиме реального времени. Программный комплекс основан на нейросетевом детекторе YOLOv11l OBB с ориентированными ограничивающими рамками. Разработанный подход обеспечивает высокую робастность к изменчивым условиям промышленной среды за счёт интеграции синтетически сгенерированных данных, полученных с использованием диффузионной модели Stable Diffusion XL Turbo. Экспериментальная апробация разработанного программного комплекса на видеопотоке выгрузки горной массы в приёмный бункер показала его работоспособность в реальных промышленных условиях: при разрешении входного изображения 640×640 пикселей достигнута производительность до 3,21 FPS на CPU в формате ONNX, что подтверждает возможность применения решения в системах оперативного мониторинга. Представленный подход демонстрирует высокий потенциал для интеграции в рамках концепции Mine-to-Mill, обеспечивая сквозную передачу данных о фрагментации от карьера до обогатительного предприятия и позволяя динамически оптимизировать параметры буровзрывных работ, дробления и измельчения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Репин, Н. Я. Процессы открытых горных работ / Н. Я. Репин, Л. Н. Репин. – Москва: Издательство “Горная книга,” 2015. – 518 с.
2. Абрамов, А. А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. 1 / А. А. Абрамов. – Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 470 с.
3. Peter Cameron. Optimize Fragmentation with ShovelCam [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.calameo.com/read/0019157965fcb9a0dc881> (дата обращения 10.12.2025).
4. Брухавецкая, А. О. Анализ современных разработок в области оценки качества дробления взорванной горной массы / А. О. Брухавецкая. – 2023. – № 5. – С. 18-31.
5. Исследование влияния параметров взорванной горной массы на производительность экскаваторноавтомобильного комплекса / М. А. Маринин, Р. А. Рахманов, В. В. Должиков, В. И. Сушкова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 35-48.
6. Маринин, М. А. Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции “mine-to-mill”: современное состояние и перспективы / М. А. Маринин, М. В. Евграфов, В. В. Должиков // Известия Томского политехнического университета. – 2021. – Т. 332. – С. 65-74.

7. McKee, D. Understanding mine to mill / D. McKee. – Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction, 2013. – 96 p.
8. Beyglou, A. Target fragmentation for efficient loading and crushing -The Aitik case: Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy / A. Beyglou, D. Johansson, H. Schunnesson. – 2017. – № 117(11). – P. 1053-1062.
9. Наиболее востребованные классы систем в цифровизации горнодобывающих предприятий [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vnedra.ru/obzor-rynka/naibolee-vostrebovannye-klassy-sistem-v-cifrovizaczi-gornodobyvayushhih-predpriyatij-21928/> (дата обращения 10.12.2025).
10. Интеллектуальные системы Motion Metrics на верной службе горнодобывающей отрасли [Электронный ресурс]. – URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_news?obj=32157dc993ed0cd15aa8f9b98daf60d2 (дата обращения 10.12.2025).
11. Обзор применения глубоких нейронных сетей и параллельных архитектур в задачах фрагментации горных пород / М. В. Ронкин, Е. Н. Акимова, В. Е. Мисилов, К. И. Решетников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2023. – Т. 12. – № 4. – С. 5-54.
12. Решетников, К. И. Исследование подхода «обнаружение объектов» в задаче фрагментации горных пород на открытых карьерах / К. И. Решетников, М. В. Ронкин, С. В. Поршнева // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48. – № 2. – С. 272-281.
13. Characterizing segregation in blast rock piles: A deep-learning approach leveraging aerial image analysis / C.-G. Liu, S.-H. Liu, C.-M. Shen [et al.] // Powder Technology. – 2025. – Vol. 464. – P. 121244.
14. Ore image segmentation method using U-Net and Res_Unet convolutional networks / X. Liu, Y. Zhang, H. Jing [et al.] // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10. – № 16. – P. 9396-9406.
15. Measuring blast fragmentation at Nui Phao open-pit mine, Vietnam using the Mask R-CNN deep learning model / T. Vu, T. Bao, Q. V. Hoang [et al.] // Mining Technology. – 2021. – Vol. 130. – № 4. – P. 232-243.
16. SAM 2: Segment Anything in Images and Videos / N. Ravi, V. Gabeur, Y.-T. Hu [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2408.00714.
17. Zhao, J. Identification of Rock Fragments after Blasting by Using Deep Learning-Based Segment Anything Model / J. Zhao, D. Li, Y. Yu // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 7. – P. 654.
18. A Survey on Concept Drift Adaptation / J. Gama, I. Zliobaite, A. Bifet [et al.] // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2014. – Vol. 46. – № 7. – P. 1-37.
19. SDXL: Improving Latent Diffusion Models for High-Resolution Image Synthesis / D. Podell, Z. English, K. Lacey [et al.] // arXiv preprint. – 2023. – arXiv 2307.01952.
20. Efimov, A. Create a Synthetic Benchmark for Rock Fragmentation Tasks / A. Efimov, K. Reshetnikov, M. Ronkin // 2025 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – 2025. – P. 81-84.

REFERENCES LIST

1. Repin, N. Ia. Protsessy otkrytykh gornykh rabot / N. Ia. Repin, L. N. Repin. – Moskva: Izdatelstvo “Gornaia kniga,” 2015. – 518 s.
2. Abramov, A. A. Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispolzovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh. T. 1 / A. A. Abramov. – Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2004. – 470 s.
3. Peter Cameron. Optimize Fragmentation with ShovelCam [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.calameo.com/read/0019157965fcb9a0dc881> (data obrashcheniia 10.12.2025).
4. Brukhavetskaia, A. O. Analiz sovremennykh razrabotok v oblasti otsenki kachestva drobleniia vzorvannoi gornoj massy / A. O. Brukhavetskaia. – 2023. – № 5. – S. 18-31.
5. Issledovanie vliianiia parametrov vzorvannoi gornoj massy na proizvoditelnost ekskavatornoavtomobilnogo kompleksa / M. A. Marinin, R. A. Rakhmanov, V. V. Dolzhikov, V. I. Sushkova // Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten. – 2023. – № 9-1. – S. 35-48.
6. Marinin, M. A. Proizvodstvo vzryvnykh rabot na zadannyi granulometricheskii sostav rudy v ramkakh kontseptsii “mine-to-mill”: sovremennoe sostoianie i perspektivy / M. A. Marinin, M. V. Evgrafov, V. V. Dolzhikov // Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2021. – Т. 332. – S. 65-74.
7. McKee, D. Understanding mine to mill / D. McKee. – Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction, 2013. – 96 p.

8. Beyglou, A. Target fragmentation for efficient loading and crushing -The Aitik case: Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy / A. Beyglou, D. Johansson, H. Schunnesson. – 2017. – № 117(11). – P. 1053-1062.
9. Naibolee vostrebovannye klassy sistem v tsifrovizatsii gornodobyvaiushchikh predpriatii [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.vnedra.ru/obzor-rynka/naibolee-vostrebovannye-klassy-sistem-v-cifrovizatsii-gornodobyvaiushchih-predpriatii-21928/> (data obrashcheniia 10.12.2025).
10. Intellektualnye sistemy Motion Metrics na vernoj sluzhbe gornodobyvaiushchei otrasli [Elektronnyi resurs]. – URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_news?obj=32157dc993ed0cd15aa8f9b98daf60d2 (data obrashcheniia 10.12.2025).
11. Obzor primeneniia glubokikh neironnykh setei i parallelnykh arkhitektur v zadachakh fragmentatsii gornykh porod / M. V. Ronkin, E. N. Akimova, V. E. Misilov, K. I. Reshetnikov // Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitelnaia matematika i informatika. – 2023. – T. 12. – № 4. – S. 5-54.
12. Reshetnikov, K. I. Issledovanie podkhoda «obnaruzhenie obiektov» v zadache fragmentatsii gornykh porod na otkrytykh karerakh / K. I. Reshetnikov, M. V. Ronkin, S. V. Porshnev // Kompiuternaia optika. – 2024. – T. 48. – № 2. – S. 272-281.
13. Characterizing segregation in blast rock piles: A deep-learning approach leveraging aerial image analysis / C.-G. Liu, S.-H. Liu, C.-M. Shen [et al.] // Powder Technology. – 2025. – Vol. 464. – P. 121244.
14. Ore image segmentation method using U-Net and Res_Unet convolutional networks / X. Liu, Y. Zhang, H. Jing [et al.] // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10. – № 16. – P. 9396-9406.
15. Measuring blast fragmentation at Nui Phao open-pit mine, Vietnam using the Mask R-CNN deep learning model / T. Vu, T. Bao, Q. V. Hoang [et al.] // Mining Technology. – 2021. – Vol. 130. – № 4. – P. 232-243.
16. SAM 2: Segment Anything in Images and Videos / N. Ravi, V. Gabeur, Y.-T. Hu [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – arXiv 2408.00714.
17. Zhao, J. Identification of Rock Fragments after Blasting by Using Deep Learning-Based Segment Anything Model / J. Zhao, D. Li, Y. Yu // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 7. – P. 654.
18. A Survey on Concept Drift Adaptation / J. Gama, I. Zliobaite, A. Bifet [et al.] // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2014. – Vol. 46. – № 7. – P. 1-37.
19. SDXL: Improving Latent Diffusion Models for High-Resolution Image Synthesis / D. Podell, Z. English, K. Lacey [et al.] // arXiv preprint. – 2023. – arXiv 2307.01952.
20. Efimov, A. Create a Synthetic Benchmark for Rock Fragmentation Tasks / A. Efimov, K. Reshetnikov, M. Ronkin // 2025 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – 2025. – P. 81-84.

Поступила в редакцию 12.12.2025 г., рекомендована к изданию 16.02.2026 г.

**THE DEVELOPMENT OF A PROBLEM-ORIENTED SYSTEM FOR ASSESSING ROCK
FRAGMENTATION IN REAL TIME**

Reshetnikov K.I., Ronkin M.V.

This paper presents the development of a software complex for the real-time assessment of rock fragmentation, based on the YOLOv11 object detection and oriented bounding box (OBB) neural model. To improve the robustness of the system and overcome the challenge of limited training data, we have used a synthetic image generation process based on Stable Diffusion XL Turbo, followed by automated labeling using Mask R-CNN and manual filtering. The paper describes the development of an algorithm for rock fragmentation assessment, which is based on the YOLO-OBB model. The algorithm was tested on a video feed of a rock mass being loaded into a receiving bin, and achieved a maximum performance of 3.21 frames per second (FPS) on a CPU (in ONNX format). This confirms the feasibility of the proposed solution for real-world mining applications.

Keywords: rock fragmentation, synthetic data, Stable Diffusion, automated control, computer vision in mining.

Решетников Кирилл Игоревич

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

Reshetnikov Kirill Igorevich

Assistant at Research and Education Center
«Artificial Intelligence» of Ural Federal University
named after the First President of Russia B.N.
Yeltsin,
Russian Federation, Ekaterinburg.
ORCID: 0009-0006-1526-0368

Ронкин Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент, 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, Associate Professor at Research and
Education Center «Artificial Intelligence» of Ural
Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
Russian Federation, Ekaterinburg.
ORCID: 0000-0001-5522-988X

СНИЖЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ РЕЗКОМ УВЕЛИЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА

© 2025 *Володин Ю.Г., Павлыш В.Н.*

В статье приводятся результаты экспериментального исследования трения и теплоотдачи в цилиндрической трубе. Результаты эксперимента показали, что резкое увеличение температуры газового потока способствует формированию тепловой и гидродинамической нестационарности, которые в сочетании с неизотермичностью создают условия, приводящие к снижению эффективности теплоотдачи. Данному процессу способствует динамика процесса нарастания температуры потока, начиная с порога 3000 К/с и более.

Ключевые слова: эксперимент, нестационарность, теплоотдача, эффективность теплоотдачи.

Введение. Эффективность теплоотдачи оценивают параметром аналогии Рейнольдса $S=2St/C_f$, представляющим собой отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту трения. Известно, что, в условиях внутренней задачи, например, при торможении потока теплоотдача увеличивается, а при ускорении наоборот снижается [1]. Иногда снижение теплоотдачи бывает если предсказуемым, то количественно неожиданным как у профессора Дейча М.Е. при исследовании обтекания сферы. Обнаруженное явление было названо «обратным переходом» или «ламинаризацией» турбулентного пограничного слоя [2]. Удовлетворением интереса к этому явлению явился ряд работ [3-6], в которых явление ламинаризации исследовалось в условиях внутренней задачи и было получено при различных видах воздействий – отрицательный продольный градиент давления, отсос пограничного слоя, охлаждение или нагрев стенки канала и др. Из названных работ выделяется [7], в которой экспериментально исследовалась структура динамического и теплового пограничных слоёв. Оказалось, что при проявлении эффекта ламинаризации турбулентного пограничного слоя, последний остается турбулентным, а механизм турбулентного переноса значительно снижается. В результате, более, чем в два раза снижается величина коэффициента теплоотдачи St и нарушается аналогия Рейнольдса.

Эксперимент. Экспериментальные исследования выполнялись на газодинамическом стенде, представляющим собой аэродинамический контур разомкнутого типа с электродуговым подогревом рабочего тела перед входом в экспериментальный канал. Экспериментальный стенд, экспериментальный канал, диагностическое оборудование подробно описаны в предыдущей статье [8].

Результаты исследований. Резкое увеличение температуры газового потока в потенциальной области с градиентами температуры 12000 К/с и скорости потока 700 м/с² формируют тепловую и гидродинамическую нестационарности, которые, в свою очередь, изменяют величины коэффициентов трения и теплоотдачи (рис. 1-2).

С изменением температуры потока изменяются теплофизические свойства рабочего тела такие, как плотность и вязкость, и, следовательно, изменяются параметры пограничных слоёв и течения в целом. В динамическом пограничном слое увеличение температуры потока сопровождается изменением интегральных характеристик [9], а перестройка кинематической структуры приводит к увеличению пристеночных касательных напряжений трения [10]. На рисунке 1 представлен график зависимости коэффициента трения в функции характерного числа Рейнольдса. На графике показана следующая динамика исследуемого процесса: 2500 K/c и 150 м/с² (точки обозначены ромбом), 6000 K/c и 350 м/с² (квадрат), 12000 K/c и 700 м/с² (треугольник).

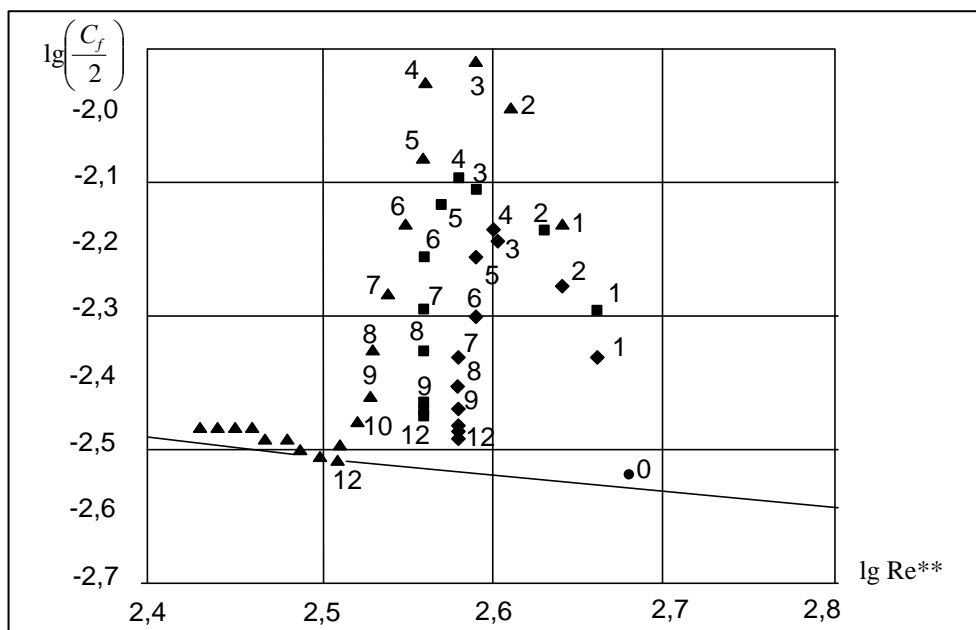


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента трения C_f от характерного числа Рейнольдса Re^{**} . Цифры обозначают время: 1 – 0,01 с; 2 – 0,02 с; 3 – 0,03 с; ... 10 – 0,1 с; 12 – 0,12 с

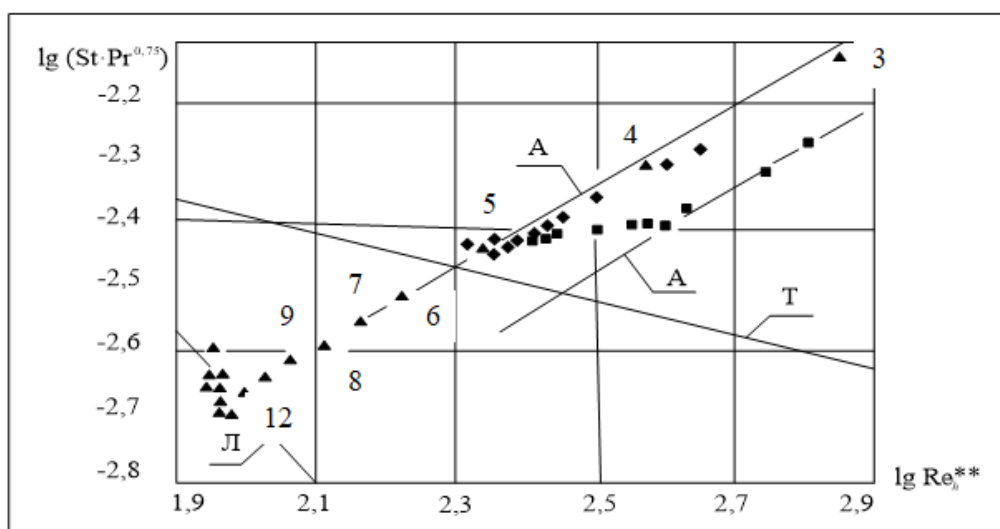


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента теплоотдачи St от числа Рейнольдса Re_n^{**} . Цифры обозначают время: 3 – 0,03 с; 4 – 0,04 с... 12 – 0,12 с.

Увеличение температуры потока и его динамики приводят к большему нарастанию величины коэффициента трения, который определяется по выражению:

$$\frac{C_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho_0 w_0^2}.$$

Массовая скорость в знаменателе величина постоянная по условиям эксперимента. Таким образом, коэффициент трения повторяет характер изменения касательных напряжений трения τ_w , которые измерялись методом «трубка-выступ». В эксперименте, кроме перепадов давления на датчиках «трубка-выступ», измерялось полное давление в форкамере P_0^* и статические давления в каждом контрольном сечении, разность которых равна $\Delta P = \frac{\rho_0 w_0^2}{2}$. К моменту времени 0,12 секунды нестационарный процесс можно считать законченным, поскольку экспериментальные точки группируются около стандартной зависимости для турбулентных режимов течения.

С увеличением температуры потока формируется тепловой пограничный слой. Измеренные в эксперименте температура потока в приосевой области и температура стенки в функции продольной координаты и времени позволили определить параметры теплового пограничного слоя. Увеличение температуры потока сопровождается прогревом пограничного слоя и увеличением температуры стенки канала. Причем, если с начала эксперимента временная производная температуры стенки канала увеличивается, что вполне логично, то начиная с момента времени 0,06 секунды производная имеет постоянную величину, т.е. стенка канала прогревается с постоянной скоростью. Плотность теплового потока, определяемая по выражению:

$$q_w = C_{pw} \rho_w \Delta w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \Delta q_w,$$

также имеет постоянную величину с момента 0,06 секунды. Здесь Δq_w – потери тепла, обусловленные свободной конвекцией и лучистым теплообменом, ввиду отсутствия теплоизоляции наружной поверхности канала, которые не превысили 5%. Коэффициент теплоотдачи α определялся по закону Ньютона:

$$\alpha = \frac{q_w}{t_0^* - t_w},$$

а характеризующий перенос тепла от газового потока к стенкам канала критерий Стантона выражением:

$$St = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)}. \quad (1)$$

На рисунке 2 кроме экспериментальных точек построены прямые: Т – стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}},$$

Л – стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}},$$

А – аппроксимационное выражение:
$$\psi_{zh} = \frac{St}{St_0} = \frac{1}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{Re_h^{**}} \frac{1}{\Delta h} \frac{d(\Delta h)}{dt}}.$$

Отслеживая перемещения экспериментальных точек, удалось определить величину производной температуры потока по времени – около 3000 градусов в секунду. С этого порога начинает снижаться величина коэффициента теплоотдачи ниже стандартного значения при увеличении температуры газового потока и уменьшении числа Re_h^{**} . На графике видно, что экспериментальные точки мигрируют в нижний левый угол и группируются около прямой Л. Данный факт свидетельствует о ламинаризации теплового турбулентного пограничного слоя (ТПС). Из анализа выражения (1), по которому определялась величина коэффициента теплоотдачи St , следует, что причиной ламинаризации ТПС является неизотермичность (т.к. массовая скорость и тепловой поток не изменяются во времени) и параметром ламинаризации следует определить температурный фактор ψ или температурный напор ΔT . По изменению величины последнего определены границы области ламинаризации ТПС $\Delta T \geq 700 K$ и переходной области от 350 до 700 K.

На рисунке 3 построен график, показывающий изменения величины относительного коэффициента теплоотдачи в функции временной координаты. В рассматриваемом самом динамичном режиме относительный коэффициент теплоотдачи изначально принимает наиболее максимальную величину. Его значения, как и в других режимах, плавно уменьшаются и в отличие от двух других к окончанию нестационарного процесса принимают значение 0,5.

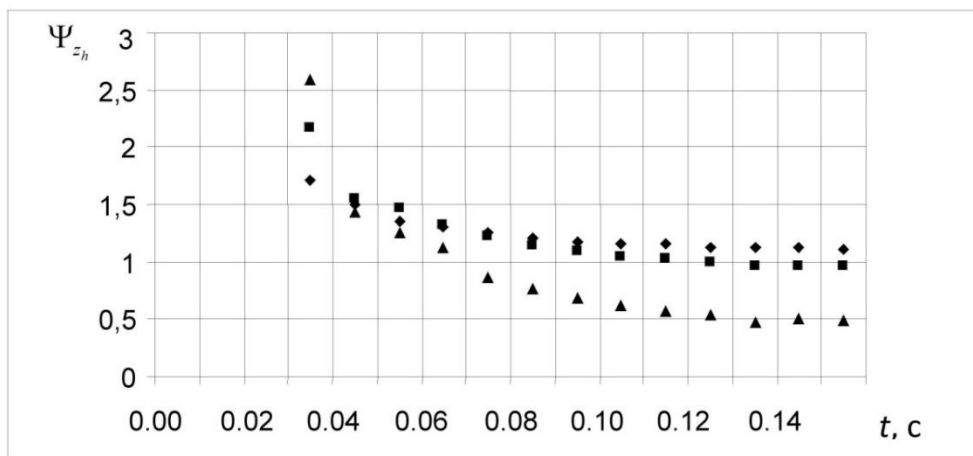


Рис. 3. Изменение во времени величины относительных коэффициентов теплоотдачи ψ_{zh}

Изменения во времени параметра S аналогии Рейнольдса представлено на графике рис. 4. Во всех трех режимах наблюдается нарушение аналогии Рейнольдса, но более существенно это имеет место в третьем режиме, когда S принимает минимальную величину, равную 0,38. Затем ситуация несколько улучшается с небольшим увеличением параметра. В целом в рассмотренной ситуации можно констатировать нарушение аналогии Рейнольдса, в особенности при высокой динамике нарастания температуры газового потока, и, как следствие, существенное снижение эффективности переноса тепла до 50 с лишним процентов.

Следует отметить, что в рассмотренном процессе резкого увеличения температуры газового потока, коэффициент трения, как видно на рис. 1, консервативен к происходящему в тепловом пограничном слое.

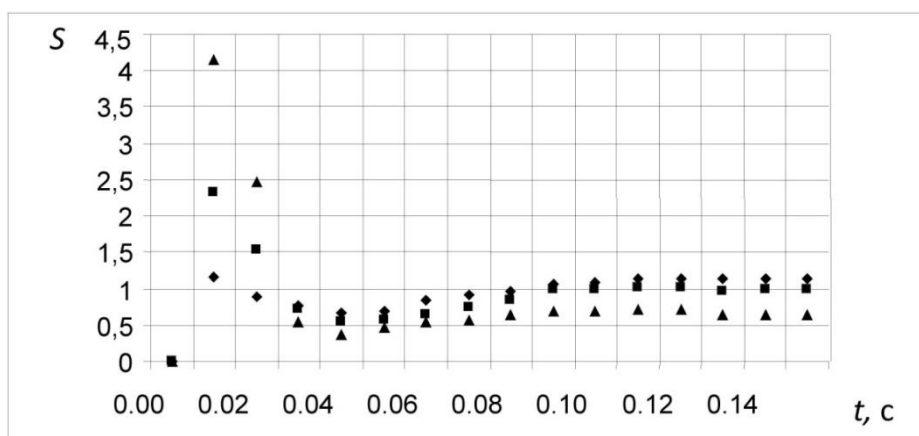


Рис. 4. Изменение во времени величины параметра S аналогии Рейнольдса

Выводы. При резком увеличении температуры газового потока формируются тепловая и гидродинамическая нестационарности, причём, чем выше динамика процесса, тем сильнее проявляются эффекты нестационарности, которые совместно с неизотермичностью создают условия по снижению эффективности теплоотдачи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. – М.: Энергия, 1972. – 342 с.
2. Дейч, М. Е. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный / М. Е. Дейч, Л. Я. Лазарев // Инженерно-физический журнал. – 1964. – Т. 7. – № 4. – С. 18 – 24.
3. Бэк, Л. Х. Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при течении в сопле / Л. Х. Бэк, П. Ф. Мэссе, Р. Ф. Каффел // Ракетная техника и космонавтика. – 1969. – Т. 7. – № 4. – С. 194– 196.
4. Dutton, R. A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer / R. A. Dutton // Report and Memoranda № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory. – 1958. – 16 p.
5. Wisniewski, R. E. Recent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 / R. E. Wisniewski, J. R. Jack // Journal of the Aerospace Sci. – 1961. – March. – P. 250.
6. Бэнкстон, К. А. Переход от турбулентного течения газа к ламинарному в нагреваемой трубе / К. А. Бэнкстон // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия: С. Теплопередача. – 1970. – Т. 92 – № 4. – С. 1–20.
7. Леонтьев, А. И. Закономерности пристенной турбулентности в градиентной области течения и при сложных тепловых граничных условиях / А. И. Леонтьев, Е. В. Шишов // Пристенные турбулентные течения. – Новосибирск: ИТФ, 1984. – С. 105–111.
8. Володин, Ю. Г. Экспериментальное изучение теплообмена при резком увеличении температуры рабочего тела / Ю. Г. Володин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 168-173. – DOI 10.5281/zenodo.17395033. – EDN YNTRSY.
9. Володин, Ю. Г. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок / Ю. Г. Володин, О. П. Марфина. – Санкт-Петербург: Изд. «Инфо-да», 2007. – 128 с.
10. Volodin, Yu. G. Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants / Yu. G. Volodin, K. S. Fedorov, M. V. Yakovlev // Russian Aeronautics. – 2006. – № 49(1). – P. 49-52.

REFERENCES LIST

1. Kutateladze, S. S. Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe / S. S. Kutateladze, A. I. Leontev. – М.: Energiia, 1972. – 342 s.

2. Deich, M. E. Issledovanie perekhoda turbulentnogo pogrannichnogo sloia v laminarnyi / M. E. Deich, L. Ia. Lazarev // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. – 1964. – Т. 7. – № 4. – С. 18–24.
3. Bek, L. Kh. Laminarizatsiia turbulentnogo pogrannichnogo sloia pri techenii v sople / L. Kh. Bek, P. F. Messe, R. F. Kaffel // Raketnaia tekhnika i kosmonavtika. – 1969. – Т. 7. – № 4. – С. 194–196.
4. Datton, R. A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer / R. A. Datton // Report and Memoranda № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory. – 1958. – 16 p.
5. Wisniewski, R. E. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 / R. E. Wisniewski, J. R. Jack // Journal of the Aerospace Sci. – 1961. – March. – P. 250.
6. Benkston, K. A. Perekhod ot turbulentnogo techeniia gaza k laminarnomu v nagrevaemoi trube / K. A. Benkston // Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya: S. Teploperedacha. – 1970. – Т. 92 – № 4. – С. 1–20.
7. Leontev, A. I. Zakonomernosti pristennoi turbulentnosti v gradientnoi oblasti techeniia i pri slozhnykh teplovykh granichnykh usloviiah / A. I. Leontev, E. V. Shishov // Pristennye turbulentnye techeniia. – Novosibirsk: ITF, 1984. – С. 105–111.
8. Volodin, Iu. G. Eksperimentalnoe izuchenie teploobmena pri rezkom uvelichenii temperatury rabocheho tela / Iu. G. Volodin // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3. – С. 168–173. – DOI 10.5281/zenodo.17395033. – EDN YNTRSY.
9. Volodin, Iu. G. Matematicheskoe modelirovanie puskovykh rezhimov energeticheskikh ustanovok / Iu. G. Volodin, O. P. Marfina. – Sankt-Peterburg: Izd. «Info-da», 2007. – 128 s.
10. Volodin, Yu. G. Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants / Yu. G. Volodin, K. S. Fedorov, M. V. Yakovlev // Russian Aeronautics. – 2006. – № 49(1). – P. 49–52.

Поступила в редакцию 08.11.2025 г., рекомендована к изданию 20.01.2026 г.

REDUCING THE EFFICIENCY OF THE CYLINDRICAL CHANNEL HEAT TRANSFER BY RAPIDLY INCREASING THE TEMPERATURE OF THE GAS FLOW

Volodin Iu.G., Pavlysh V.N.

The article presents the results of an experimental study of friction and heat transfer in a cylindrical tube. The results of the experiment showed that a sharp increase in the temperature of the gas stream contributes to the formation of thermal and hydrodynamic instability, which in combination with non-isothermal conditions create conditions that lead to a decrease in the efficiency of heat transfer. This process is facilitated by the dynamics of the process of increasing the temperature of the flow, starting from the threshold of 3000 K/c and more.

Keywords: experiment, nonstationarity, heat transfer, efficiency of the heat transfer.

Володин Юрий Гурьянович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических объектов водного транспорта Института морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева – Казанского филиала ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: yu.g.volodin@mail.ru

Volodin Iurii Gurianovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electromechanical Water Transport Facilities of Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev - Kazan Branch «Volga State University of Water Transport»,
Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.
ORCID: 0000-0002-7621-1520

Павлыш Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pavlyshvn@mail.ru

Pavlysh Vladimir Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

АДАПТАЦИЯ ТЕОРИИ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

© 2026 Косорлуков И.А., Соловьев А.В., Тимченко М.С., Строчков А.В.

На основе объектно-ориентированного подхода к элементам интеллектуальных систем электроснабжения разработан метод моделирования устройств управляемой коммутации выключателя. Адаптация теории конечных автоматов предлагает механизмы описания процесса включения коммутационных аппаратов с учетом состояния связанных устройств на основе булевой алгебры. Предложенный метод моделирования позволяет создавать виртуальные модели коммутации выключателей, которые могут использоваться для анализа их работы в различных режимах, выявления потенциальных проблем и оптимизации параметров управления. Это способствует повышению надежности и эффективности работы интеллектуальных систем электроснабжения.

Ключевые слова: интеллектуальные системы электроснабжения, цифровой РЭС, автоматизация, объектно-ориентированный подход, управление выключателем, конечные автоматы.

Введение. Одним из ключевых направлений эволюции систем автоматизации в электроэнергетике является цифровизация, развитие которой привело к появлению концепции «Цифровых распределительных электрических сетей» [1]. Эта концепция подразумевает модернизацию существующих и строительство новых объектов электроэнергетики на основе современных цифровых технологий, что позволяет производить замену классических способов автоматизации, сбора, передачи и обработки данных на основе информационных технологий [2]. Построение автоматизированных систем передачи и распределения электрической энергии предполагает централизованную иерархическую вертикаль управления, сбора мониторинговой информации, принятия решений и конфигурации подчинённых элементов. Такой подход соответствует стандартному построению автоматизированных структур с передачей данных на верхний уровень хранения и обработки информации. К таким структурам можно отнести системы учета электроэнергии, телемеханики, телеизмерения, телеуправления и т.д. В качестве альтернативного подхода к построению автоматизированных, и в перспективе, автоматических систем электроснабжения и распределения электроэнергии, предлагается концепция «Интеллектуальной системы управления процессами электроснабжения» (ИСУПЭ), в основании которой положен объектно-ориентированный принцип (ООП) построения систем электроснабжения (ООПСЭ) [3].

В распределительных сетях среднего напряжения (6-20 кВ) важную роль играют распределительные подстанции (РП). Их организация подразумевает деление на секции, каждая из которых включает в себя комплекс функциональных модулей. Главная цель РП – переключение компонентов электрической сети, что обеспечивается использованием ячеек отходящих фидеров (ЯОФ). Комбинируя возможности ООП для сложных электротехнических систем с концепциями теории конечных автоматов (ТКА), открывается перспектива создания универсального подхода к моделированию интеллектуальных систем управления электрическими подстанциями.

Создание теоретической модели коммутационных аппаратов, базирующейся на адаптированной ТКА и использующей принципы преобразования логических выражений посредством алгебры логики, дает возможность установить методы разработки управляющих элементов автоматизированных и автоматических ИСУПЭ.

Нельзя не отметить, что уже на протяжении многих лет в электрических сетях активно эксплуатируются микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА). По своей сути они осуществляют замену «релейной» логики электромеханических устройств прошлых лет на цифровую, бинарную логику, реализованную на базе быстродействующего вычислительного устройства. Одним из основных преимуществ таких устройств является принципиальная возможность реализации т.н. «гибкой» логики, т.е. свободно конфигурируемых алгоритмов. В устройствах некоторых производителей гибкая логика является дополнением к основному, «жестким», алгоритмам (пример – терминалы БЭ2704 производства ООО НПП «ЭКРА», терминалы БЭМП производства АО «ЧЭАЗ»), в то время как в других вся логика целиком может быть изменена при необходимости (пример – терминалы производства ООО «НПП Бреслер»). Помимо этого, современные микропроцессорные устройства РЗА поддерживают протоколы обмена данными, описанные в серии стандартов МЭК 61850 (в частности, Sampled Values - SV, General Object-Oriented Substation Event - GOOSE, Manufacturing Message Specification - MMS). Принципиальный смысл МЭК 61850 заключается в обеспечении унифицированных цифровых взаимодействий между разными устройствами РЗА, в том числе разных производителей. В этом плане интерес представляет организация этих взаимодействий, которая основана на применении объектно-ориентированной модели данных. Суть этой модели заключается в том, что у каждого физического устройства выделяется иерархическая структура по функциональному назначению, включающая логические устройства, логические узлы, объекты данных и атрибуты. Однако МЭК 61850 регламентирует только взаимодействие между отдельными устройствами, а не внутренние алгоритмы работы, входные и выходные переменные которых лишь сопрягаются с объектно-ориентированной моделью МЭК 61850. Следующим логическим шагом будет распространение объектно-ориентированных принципов непосредственно на алгоритмы работы устройств, что позволит получить унифицированный, универсальный подход к управлению оборудованием.

Определение структуры ЯОФ. Использование ООП при моделировании устройств находит применение в разных сферах технических систем, представляя собой гибкий инструмент для решения практических задач [4]. В основе ООПСЭ лежит концепция ООП [5], основополагающим элементом которого является понятие «объект». Объекты объединяют данные и методы их обработки, формируя модульные, гибкие и повторно используемые элементы. Формирование взаимодействий между элементами программы определяется методами: инкапсуляция, наследование, полиморфизм, абстракция. Как и в ООП, в ООПСЭ первичным звеном структуры является понятие «объект», являющееся физическим оборудованием электроустановок, выполняющим заданную функцию. К «объектам» относятся такие физические элементы электроснабжения, как коммутирующее оборудование (выключатели, силовые трансформаторы, генераторы нагрузки и т.д.). Объекты по своему функциональному назначению объединяются в классы, взаимодействуя друг с другом внутри «класса» и вне «класса», обмениваясь данными и вызывая методы друг друга. Как и объекты, классы могут иметь собственные методы, основанные на преобразовании физических величин в аналоговый или цифровой формат.

Применение принципов ООПСЭ для моделирования автоматизированных и автоматических систем позволяет систематизировать, классифицировать и структурировать элементы электроэнергетических систем, а также разрабатывать новые способы информационного взаимодействия между элементами [3], формируя структуру ИСУПЭ. Наследование позволяет создавать новые классы на основе существующих, добавляя или изменяя их функциональность. Например, от класса «Выключатель» можно наследовать класс «ЯОФ», добавив методы приема и оцифровки данных. Класс «РП» наследует класс «ЯОФ», взаимодействуя как с ним, так и с классом «Выключатель» напрямую.

Объект «Коммутатор» определяет класс «Выключатель». Класс «Выключатель» представляет собой обобщенное описание выключателя определенного типа, включающее в себя набор свойств, методов и функций, характерных для данной категории устройств. Полиморфизм обеспечивает возможность обработки объектов различных классов единообразным способом. Например, метод «Управление» может быть вызван для любого объекта, унаследованного от класса «Выключатель», независимо от его конкретного типа. В зависимости от класса объекта будет выполнена соответствующая реализация метода «Управление».

Инкапсуляция позволяет скрыть внутреннюю реализацию методов и данных от внешнего воздействия, обеспечивая защиту от несанкционированного доступа и упрощая структуру взаимодействия. Доступ к переменной, отвечающей за состояние выключателя, может быть ограничен специальным методом «Управление», что исключает возможность случайного изменения значения напрямую. Применение принципов ООП к разработке устройств управления позволяет создать гибкую, масштабируемую и легко поддерживаемую систему управления, способную адаптироваться к изменяющимся требованиям и новым технологиям.

Таким образом, применение принципов ООП при разработке модели ЯОФ позволяет создать модульную, масштабируемую и легко поддерживаемую систему управления данными [6]. Наследование, полиморфизм и инкапсуляция обеспечивают гибкость, расширяемость и надежность системы, позволяя адаптироваться к изменяющимся требованиям и новым технологиям. Использование элементов электронной логики для реализации методов класса «ЯОФ» дополнительно повышает эффективность, быстродействие и надежность системы электроснабжения.

На основе принципов ООП можно сформировать структуру элементов, входящих в состав ЯОФ, и классов распределительных устройств. Структурная схема взаимосвязей ЯОФ с интеграцией в класс распределительных пунктов 6-20 кВ представлена на рисунке 1.

Методы и функции ООП позволяют преобразовать исходные переменные для достижения результирующего сигнала, осуществляя преобразования и создавая промежуточные статические переменные. В отличие от них функции способны сохранять, обрабатывать и формировать динамические сигналы, оказывающие воздействие на характеристики объектов, а также реализовывать управляющие действия. Используя методы и функции, первичные величины преобразуются в булевы переменные. Такие переменные могут формировать логические значения в зависимости от наличия напряжения, превышения установленной величины тока, положения контактов и т.д.

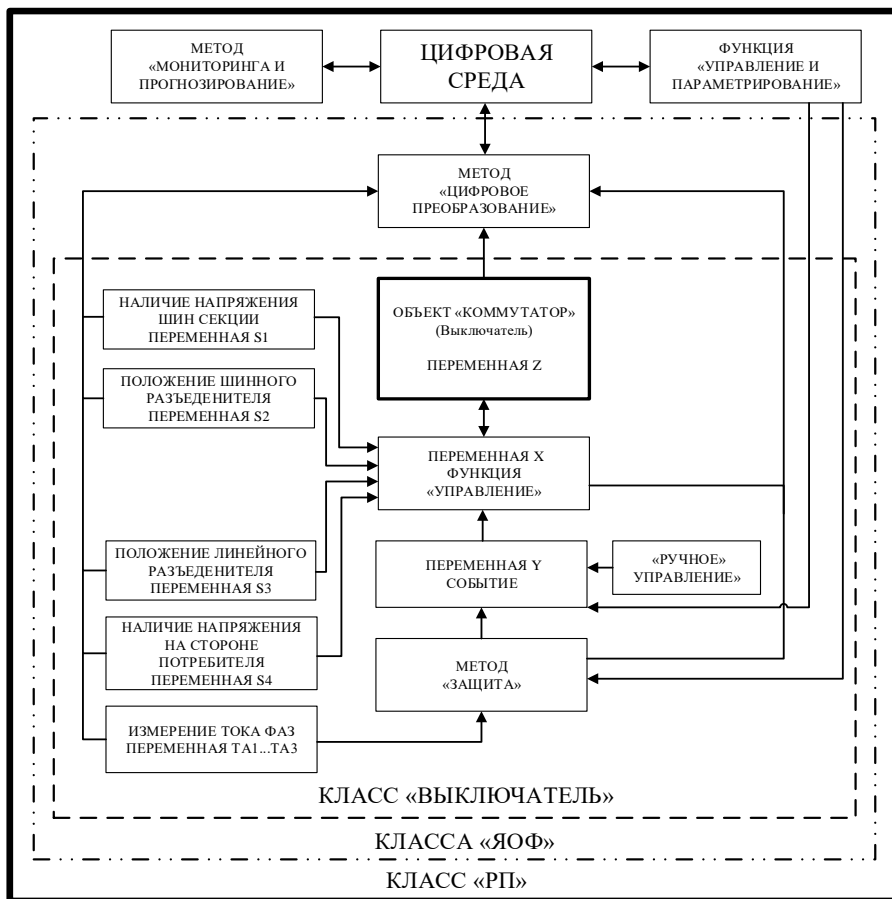


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязей ЯОФ с интеграцией в класс распределительных пунктов 6-20 кВ на основе объектно-ориентированного подхода

Применение ТКА для моделирования функции «Управление». Для коммутационных аппаратов, находящихся в механической, электромеханической и гальванической связи с другими элементами, требуется адаптация ТКА [7]. Для этого необходимо сформулировать общие логические взаимосвязи, позволяющие описать процессы как внутри элемента, так и их взаимодействие между собой. ООП и ТКА являются одной из ключевых областей в информатике, которая нашла широкое применение в различных сферах. Эта теория изучает абстрактные вычислительные устройства, способные переходить из одного состояния в другое при достижении определенного состояния внешних сигналов. Конечные автоматы (КА) широко применяются в области информационных технологий, используются для моделирования различных процессов и поведения систем. Благодаря своей простой структуре и эффективности, конечные автоматы являются мощным инструментом для решения задач в сфере информационных технологий. КА играют важную роль в системах автоматизации благодаря своей способности моделировать процессы на основе заданных правил и условий [8]. Основным функциональным свойством выключателя является коммутация прилегающей сети или устройств, а основными свойствами выключателя как логического устройства являются два статических состояния: «включено» — логическая 1, «выключено» — логический 0. Именно переход из состояния 0 в состояние 1 или обратно является основным назначением выключателя как элемента событийного взаимодействия, порождающего событие для связанных объектов, и также является свойством класса «Ячейка».

На рисунке 2 представлена обобщённая модель системы преобразования бинарной информации в соответствии с адаптированной теорией конечных автоматов (АТКА).

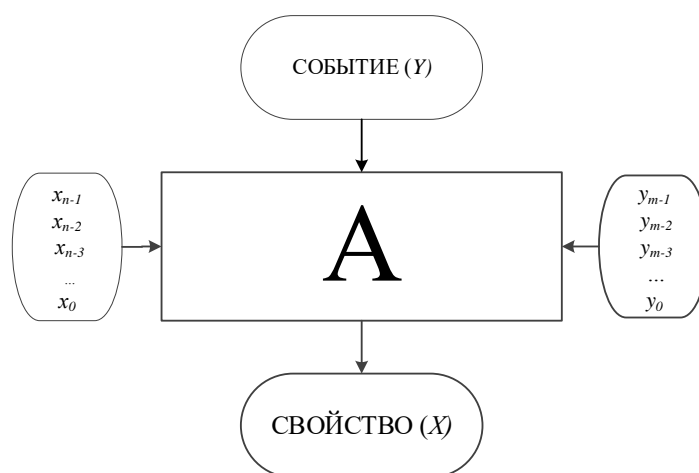


Рис. 2. Обобщённая модель системы преобразования бинарной информации в соответствии с адаптированной теорией конечного автомата

Здесь и далее приняты следующие обозначения:

X – двоичная (бинарная) переменная, отражающая состояние рассматриваемого объекта. Например, для выключателя – это замкнутое или разомкнутое состояние главных контактов;

Y – событие (внешнее воздействие на рассматриваемый объект);

x, y – переменные, отражающие состояние прочих связанных элементов и узлов.

В соответствии с моделью рисунка 2 определяем основные состояния и типы взаимодействий только в части влияния на логическое состояние Объекта при коммутации. Переход из состояния «выключено» в состояние «включено» (или наоборот), возможен только под внешним воздействием Y которое может быть как физическим, так и исполнительным от других устройств. Событие Y изменяет текущее состояние системы в интегрированном операторе преобразования A и запускает цепочку взаимосвязанных процессов с проверкой логического состояния переменной X . Информация о логическом состоянии связанных элементов ближнего окружения поступает в виде двух бинарных n - и m - разрядных комбинаций. Исходя из возможных физических состояний коммутационного аппарата, производим переход к описанию логического построения оператора преобразования A . Процесс коммутации разбивается на периоды времени: до начала коммутации t_- , во время коммутации t_0 (физический переход контактов выключателя в положение Z , противоположное состоянию X), непосредственно после коммутации t_+ и после перехода системы в стабильное состояние t . Началом коммутации t_- является наступление «события» $Y = \overline{X}$, при котором система переходит в противоположное логическое состояние X , при достижении необходимого логического состояния логических функций связанных устройств $F_s(x)$ и $F_d(y)$. Функция $F_s(x)$ выполняет роль блокировки перехода X из периода коммутации t_- в состояние t_0 , а функция $F_d(y)$ является подтверждением факта коммутации, позволяя перейти к периоду времени t . Хранение информации о предыдущем состоянии системы может осуществляться логически связанными переменными, называемыми «односторонне зависимые бинарные логические переменные» вида $X = YF$, где F – функция от логических переменных, а $Y = \overline{X}$.

Структурная схема логических связей оператора преобразования A представлена на рисунке 3.

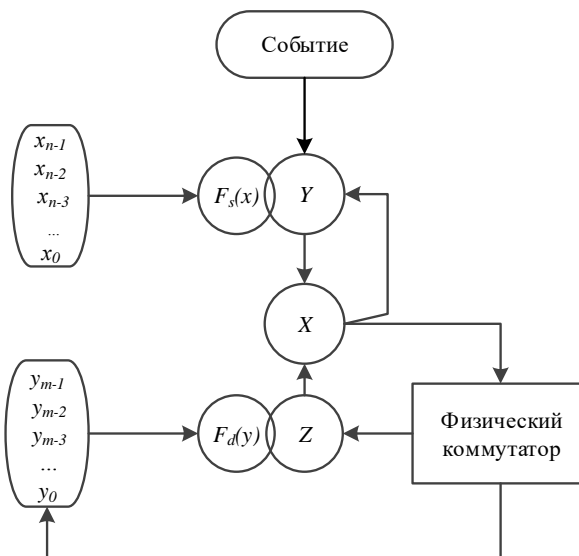


Рис. 3. Структурная схема логических связей оператора преобразования A

Согласно полученной структуре логических связей (рисунок 3), очевидно, что основным переходным процессом является включение выключателя или переход из состояния «выключено» в состояние «включено» ($X=0 \rightarrow X=1$). Именно этот процесс наиболее опасен для выключателя, так как коммутация при неверном состоянии связанных элементов приводит к аварийному включению выключателя, значительно уменьшая его срок эксплуатации, вплоть до полного отказа узлов и механизмов. Неправильная последовательность операций, вызванная несогласованностью в работе приводов, блокировок и других вспомогательных устройств, создает предпосылки для возникновения переходных процессов с большими токами и перенапряжениями. Эти аномальные режимы оказывают разрушительное воздействие на изоляцию, контакты и механические узлы выключателя, провоцируя электрические пробой, обгорание контактов и деформацию конструктивных элементов.

Кроме того, некорректная коммутация часто сопровождается повышенным уровнем вибрации и шума, свидетельствующим о нештатной работе выключателя. Подобные отклонения от нормального функционирования требуют немедленного вмешательства и проведения диагностики для выявления и устранения причин, вызвавших аварию.

Статическая функция $F_s(x)$ определяет готовность связанных устройств камеры выключателя до начала коммутации, а функция $F_d(x)$ подтверждает правильность включения, с возможностью прерывания процесса коммутации в случае неверного состояния системы в момент воздействия сигнала Y . Представим зависимости логических связей оператора преобразования A в виде системы булевых выражений:

$$\begin{cases} Y = \neg X, & \text{при } t_- \\ Z = YF_c, & \text{при } t_0 \\ X = ZF_d, & \text{при } t_+ \\ Y = X, & \text{при } t \end{cases} \quad (1)$$

Применительно к ячейкам 6-20 кВ, функция $F_s(x)$ принимает булево значение 1 в случае верного положения линейного и шинного разъединителей (включены), заземляющих ножей (отключены), наличия питания на приводе выключателя и устройствах РЗА, контактов положения выкатного элемента и прочих элементов контроля, не изменяющих свое состояние после включения выключателя. Физически контроль данных условий осуществляется путем заведения соответствующих дискретных сигналов со вспомогательных контактов (разъединители, заземляющие ножи, положение выкатного элемента), наличие оперативного тока может контролироваться напрямую высокоомным дискретным входом. Непосредственная проверка правильного состояния (т.е. состояния, допускающего коммутацию) производится при помощи описанной далее логической функции. С точки зрения выходного результата, описываемый ниже подход не отличается от реализованных в существующих устройствах алгоритмов оперативных блокировок, но в то же время позволяет получить формализованный подход к управлению. Итак, учитывая, что некоторые элементы должны быть включены и иметь логическое значение 1, а другие отключены (правильное положение равно логическому значению 0), заменим функцию $F_s(x)$ булевой функцией $F_c(i_n, g_b)$, которая принимает значение 1 при готовности внешнего окружения к коммутации. По законам булевой алгебры, для получения общего сигнала, допускающего коммутацию, используется логическое «И», то есть произведение всех логических переменных должно иметь значение 1:

$$F_c(i_n, g_b) = \prod_{n=0}^{n-1} i_n \wedge \prod_{b=0}^{b-1} \bar{g}_b, \quad (2)$$

где $F_c(i_n, g_b)$ – бинарная статическая функция состояния внешних устройств, не зависящих от положения коммутатора; n – количество «прямых» сигналов состояния связанных устройств до начала коммутации; b – количество инвертированных сигналов состояния связанных устройств до начала коммутации; i_n – логическое «включено» до коммутационного периода t ; g_b – инвертированное логическое «выключено» до коммутационного периода.

К элементам, меняющим свое состояние непосредственно после коммутации, можно отнести: вспомогательные контакты и положение механического указателя (бленкера) выключателя; наличие напряжения на отходящих шинах; наличие тока во вторичных цепях трансформаторов тока; сигнал готовности устройств РЗА и т.д. Функцию $F_d(x)$ после коммутационного периода t_+ заменяем на $F_c(s_k, v_m)$:

$$F_c(s_k, v_m) = \prod_{k=0}^{k-1} s_k \wedge \prod_{m=0}^{m-1} \bar{v}_m, \quad (3)$$

где $F_c(s_k, v_m)$ – бинарная динамическая функция состояния внешних устройств, зависящих от коммутации; k – количество «прямых» сигналов состояния связанных устройств после коммутации; m – количество инвертированных сигналов состояния связанных устройств после коммутации; s_k – логическое «включено» после коммутационного периода t_+ ; v_m – инвертированное логическое «выключено» после коммутационного периода t_+ .

Обобщая рисунки 1, 2 и математическое описание логических функций $F_c(i_n, g_b)$ и $F_c(s_k, v_m)$, получаем структурную схему бинарных взаимосвязей адаптированной теории конечного автомата, представленную на рисунке 3.

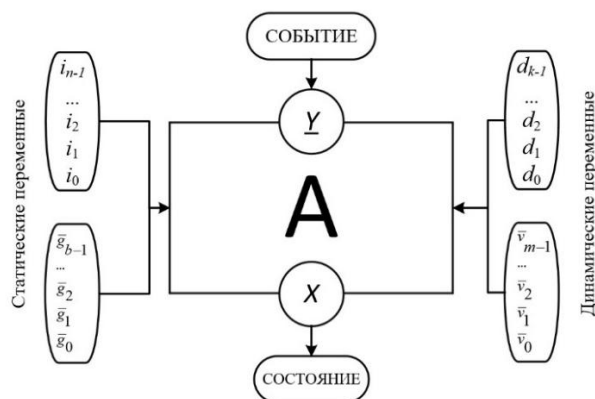


Рис. 4. Структурная схема бинарных взаимосвязей адаптированной теории конечного автомата

Математическое описание адаптированной теорией конечного автомата, с учетом (1), (2) и (3), принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Y = \neg X, & \text{при } t_- \\ F_c(i_n, \bar{g}_b) = \prod_{n=0}^{n-1} i_n \wedge \prod_{b=0}^{b-1} \bar{g}_b, & \text{при } t_- \\ Z = YF_c(i_n, \bar{g}_b), & \text{при } t_0 \\ F_c(s_k, \bar{v}_m) = \prod_{k=0}^{k-1} s_k \wedge \prod_{m=0}^{m-1} \bar{v}_m, & \text{при } t_+ \\ X = ZF_d(s_k, \bar{v}_m), & \text{при } t_+ \\ Y = X, & \text{при } t \end{array} \right. \quad (4)$$

Параметры (1), (2) и (3) интегрированы в матрицу переходов состояний автомата, определяющую логику работы устройства управляемой коммутации. Данное описание позволяет формализовать процесс проектирования, обеспечивая возможность автоматической генерации управляющих последовательностей.

Использование АТКА обеспечивает детерминированность и предсказуемость поведения коммутационного устройства, что критически важно для обеспечения безопасности и надежности электроэнергетической системы. Математическая модель позволяет проводить верификацию и валидацию разработанных алгоритмов управления до их аппаратной реализации.

Моделирование устройства функции «Управление». На основе уравнения (4) произведена эмуляция логического устройства на базе бесплатно распространяемого программного продукта Logisim v.2.7.1. Смоделированная схема представлена на рисунке 5. Данная модель отражает обобщенный алгоритм управления выключателем. Изображенное на рисунке состояние схемы отражает подачу команды на включение выключателя (на выходе логическая «единица»). Y – это вход схемы, на который подается команда управления. Допустимость операции контролируется двумя блоками: «статические контакты» ($x_1...x_8$) и «динамические контакты» ($y_1...y_8$). «Статические контакты» отражают состояние связанных устройств, не изменяющих своё положение после коммутации выключателя, например включенное положение разъединителя (логическая «единица» прямом входе) и отключенное положение заземляющего ножа (логический «ноль» на инверсном входе).

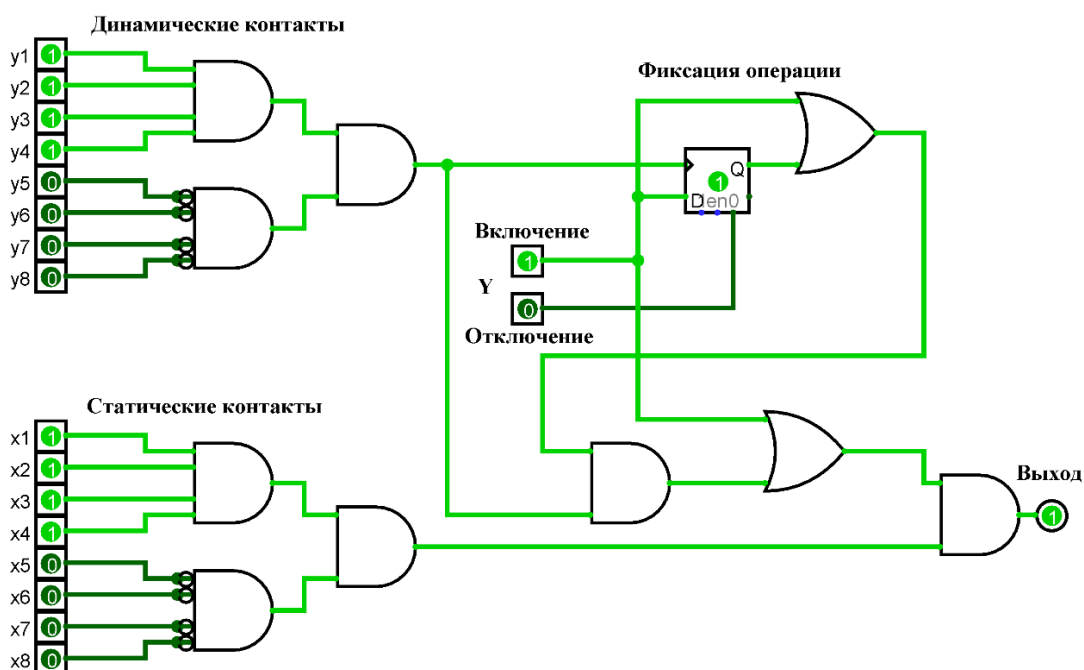


Рис. 5. Результаты моделирования устройства метода «Управление» в программном комплексе Logisim

Иначе говоря, именно в этом блоке реализуется алгоритм оперативных блокировок. Блок «динамические контакты» контролирует устройства, состояние которых может измениться после коммутации, например положение блок-контактов выключателя, сигналы готовности привода и т.д. Чтобы изменение этих сигналов во время коммутации не приводило к «срыву» операции, их состояние фиксируется цепью подхвата с применением триггера.

На основе полученной эмуляции (рисунок 6) разработан прототип устройства метода «Управление», на элементах логики серий К555 и К115, представленный на рисунке 6.

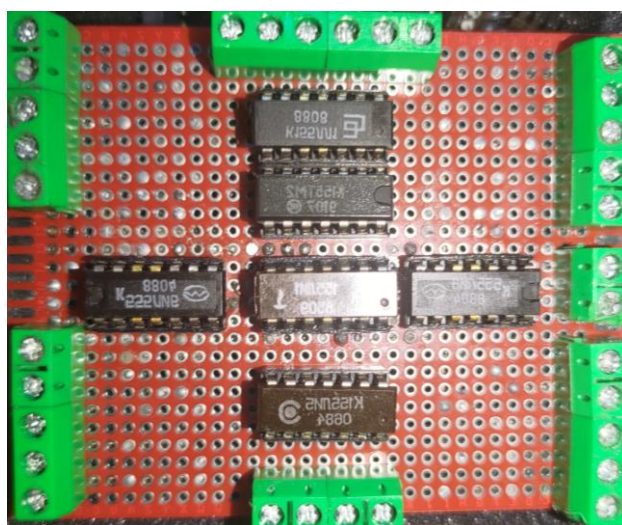


Рис. 6. Внешний вид прототипа устройства метода «Управление»

Представленное устройство функционально соответствует уравнению (4) и модели рисунка 5. Предложенный прототип использует постоянное номинальное напряжение питания $5 \text{ В} \pm 5 \%$; выходное напряжение низкого уровня $\leq 0,4 \text{ В}$; выходное напряжение высокого уровня $\geq 2,4 \text{ В}$. Для сохранения текущего положения управляемого выключателя применена микросхема K155TM2, представляющая собой 2 D-триггера. Для реальных устройств требуется применять логические микросхемы повышенного напряжения 12–15 В серии K511 или аналогичные [9].

Предложенный метод также открывает перспективы для разработки адаптивных систем управления коммутацией, способных оперативно реагировать на изменения в сети и оптимизировать режимы работы оборудования. Это достигается за счет возможности изменения матрицы переходов состояний автомата в реальном времени, что позволяет адаптировать логику управления к текущим условиям.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку специализированных языков описания для автоматической генерации моделей конечных автоматов, а также создание средств автоматической верификации и синтеза логических схем на основе разработанных моделей. Применение метода АТКА не ограничивается выключателями распределительных устройств 6–20 кВ, но и применимо к любым коммутационным аппаратам, имеющим управляемый привод.

Выводы. Полученный метод позволяет разрабатывать быстродействующие устройства управляемой коммутации на основе электронных логических компонентов. Применение устройств, построенных на общих принципах бинарного взаимодействия связанных элементов, на основе методов ООПСЭ и АТКА, обеспечивает не только снижение рисков аварийного включения коммутационного оборудования, но и позволяет формировать сложные системы распределительных пунктов различного напряжения. Быстродействие устройств и комплексов на их основе положительно влияет не только на общий эксплуатационный ресурс электроустановок [10], но и на электроэнергетические системы в целом.

Разработанный метод открывает новые горизонты в создании интеллектуальных систем управления электроэнергетическими сетями. Возможность интеграции устройств, основанных на принципах ООПСЭ, и АТКА, в существующую инфраструктуру позволяет оптимизировать процессы переключения и распределения энергии, минимизируя потери и повышая общую эффективность системы. Перспективы использования данного подхода распространяются на разработку адаптивных систем защиты электрооборудования. Благодаря высокой скорости реакции и возможности прогнозирования аварийных ситуаций, устройства, построенные на основе предложенного метода, способны предотвращать серьезные повреждения и сокращать время простоя оборудования. В конечном итоге, внедрение устройств управляемой коммутации, разработанных с использованием методов ООПСЭ и АТКА, способствует повышению надежности, безопасности и эффективности электроэнергетических систем, а также снижает операционные издержки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. НТИ «Энерджинет». Концепция проекта «Цифровой РЭС». Опыт реализации: Янтарьэнерго. / [Электронный ресурс]. – URL: <https://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2017/11/Tavrida-Elektrik-EnergyNet-TSPS-Kontseptsiya-TSRES.pdf> (дата обращения 10.11.2025).
2. Кабаков, А. И. Цифровизация распределительных сетей 6-10 кВ / А. И. Кабаков, С. В. Пономарев // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-1(102). – С. 162-165. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.162.165.

3. Интеллектуальная система управления процессами электроснабжения / И. А. Косорлуков, А. В. Соловьев, М. С. Тимченко, А. В. Строчков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 155-161. – DOI 10.5281/zenodo.14018682. – EDN JPLMAC.
4. Приёмы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. – СПб.: Питер, 2021. – 368 с. – ISBN 978-5-4461-1595-2.
5. Петров, П. В. Объектно-ориентированный подход при проектировании устройств гидроавтоматики летательного аппарата / П. В. Петров, В. А. Целищев, Д. А. Кудерко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 66. – С. 88-97. – DOI 10.15593/2224-9982/2021.66.09.
6. Гуськов, М. Ю. Принципы объектного подхода в разработке систем промышленной автоматизации / М. Ю. Гуськов, Л. В. Гурьянов // Новые информационные технологии и системы: сборник научных статей XIII Международной научно-технической конференции, Пенза, 23–25 ноября 2016 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2016. – С. 117-118.
7. Галиаскаров, Э. Г. Моделирование поведения объектов с помощью концепции конечных автоматов / Э. Г. Галиаскаров // Объектные системы. – 2011. – № 3. – С. 95-99.
8. Финаев, В. И. Моделирование систем: учебное пособие / В. И. Финаев. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 181 с.
9. Москатов, Е. А. Справочник по полупроводниковым приборам. 2-е изд. / Е. А. Москатов. – Таганрог: [б. и.], 2010. – 219 с.
10. Определение остаточного ресурса выключателей 6-10 кВ с учетом влияния уставок релейной защиты и величины сквозного тока короткого замыкания / И. А. Косорлуков, А. В. Соловьев, М. С. Тимченко, А. В. Строчков // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 5. – С. 56-63.

REFERENCES LIST

1. NTI «Enerzhinet». Kontsepsiia proekta «Tsifrovoy RES». Opyt realizatsii: Iantarenergo. / [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2017/11/Tavrida-Elektrik-EnergyNet-TSPS-Kontsepsiya-TSRES.pdf> (data obrashcheniia 10.11.2025).
2. Kabakov, A. I. Tsifrovizatsiia raspredelitelnykh setei 6-10 kV / A. I. Kabakov, S. V. Ponomarev // Nanoindustriia. – 2020. – T. 13, № S5-1(102). – S. 162-165. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.162.165.
3. Intellectualaia sistema upravleniia protsessami elektrosnabzheniia / I. A. Kosorlukov, A. V. Solovev, M. S. Timchenko, A. V. Strochkov // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 3. – S. 155-161. – DOI 10.5281/zenodo.14018682. – EDN JPLMAC.
4. Priemy obieektno-orientirovannogo proektirovaniia. Patterny proektirovaniia / E. Gamma, R. Khelm, R. Dzhonson, Dzh. Vliissides. – SPb.: Piter, 2021. – 368 s. – ISBN 978-5-4461-1595-2.
5. Petrov, P. V. Obieektno-orientirovannyi podkhod pri proektirovanii ustroystv gidroavtomatiki letatel'nogo apparata / P. V. Petrov, V. A. Tselishchev, D. A. Kuderko // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika. – 2021. – № 66. – S. 88-97. – DOI 10.15593/2224-9982/2021.66.09.
6. Guskov, M. Iu. Printsipy obieektnogo podkhoda v razrabotke sistem promyshlennoi avtomatizatsii / M. Iu. Guskov, L. V. Gurianov // Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: sbornik nauchnykh statei XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Penza, 23–25 noiabria 2016 goda. – Penza: Penzenskii gosudarstvennyi universitet, 2016. – S. 117-118.
7. Galiaskarov, E. G. Modelirovanie povedeniia obieektov s pomoshchiu kontsepsii konechnykh avtomatov / E. G. Galiaskarov // Obieektnye sistemy. – 2011. – № 3. – S. 95-99.
8. Finaev, V. I. Modelirovanie sistem: uchebnoe posobie / V. I. Finaev. – Taganrog: Izd-vo IuFU, 2013. – 181 s.
9. Moskatov, E. A. Spravochnik po poluprovodnikovym priboram. 2-e izd. / E. A. Moskatov. – Taganrog: [b. i.], 2010. – 219 s.
10. Opredelenie ostatochnogo resursa vykliuchatelei 6-10 kV s uchetom vliianiia ustavok releinoi zashchity i velichiny skvoznogo toka korotkogo zamykaniia / I. A. Kosorlukov, A. V. Solovev, M. S. Timchenko, A. V. Strochkov // Energobezopasnost i energosberezhenie. – 2024. – № 5. – S. 56-63.

Поступила в редакцию 17.11.2025 г., рекомендована к изданию 22.01.2026 г.

ADAPTATION OF THE THEORY OF FINITE AUTOMATA FOR MODELING DEVICES OF INTELLIGENT POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON AN OBJECT-ORIENTED APPROACH

Kosorlukov I.A., Solovev A.V., Timchenko M.S., Stochkov A.V.

A method for controlled switching devices modelling has been developed based on an object-oriented approach to the elements of smart power supply systems. Adaptation of the theory of finite automata offers tools and methods for describing the process of switching devices actuation considering the state of associated devices based on Boolean algebra. The proposed modeling method allows to create virtual switch actuation models that can be used to analyze their operation in various modes, identify potential problems, and optimize control parameters. This helps to increase the reliability and efficiency of intelligent power supply systems.

Keywords: intelligent power supply systems, digital distribution zone, automation, object-oriented approach, switch control, finite automata.

Косорлуков Игорь Андреевич

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем, доцент ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: kosorlukov@gmail.ru

Kosorlukov Igor Andreevich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automated electric power systems, Assistant Professor of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.
ORCID: 0009-0000-9247-6193

Соловьев Александр Владимирович

ведущий инженер кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.

Solovev Aleksandr Vladimirovich

Lead Engineer at Department of Automated electric power systems of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.
ORCID: 0009-0006-1868-238X

Тимченко Максим Сергеевич

кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: mairon@mail.ru

Timchenko Maksim Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer at Department of Automated electric power systems of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

Строчков Алексей Владимирович

аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: wormslabs@yandex.ru

Stochkov Aleksei Vladimirovich

Postgraduate student at Department of Automated electric power systems of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.
ORCID: 0009-0002-5843-6790

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБКИ РАНКА-ХИЛША В СИСТЕМАХ ОБОГРЕВА МОБИЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

© 2026 Гафуров М.М., Кулагина Т.А.

Актуальность работы обусловлена необходимостью технических и технологических решений, обеспечивающих эффективный и безопасный обогрев быстровозводимых временных сооружений. При возникновении ЧС природного или техногенного характера в труднодоступных и отдаленных районах в холодное время года для оказания помощи и обеспечения пострадавшим условий, в которых можно без дополнительного риска для жизни при низких температурах, оказывать первую помощь и проводить иные мероприятия. Предложен способ обогрева, быстровозводимых на короткий срок автономных объектов, на базе вихревой трубки Ранка-Хилша. Данный способ позволяет максимально быстро создать условия для комфортного нахождения в временном сооружении.

Ключевые слова: трубка Ранка-Хилша, вихревой эффект, временные сооружения.

Введение. В условиях эксплуатации мобильных и временных сооружений — вахтовых посёлков, полевых баз, аварийно-спасательных пунктов, строительных площадок и других объектов временной инфраструктуры — одной из ключевых инженерных задач остаётся обеспечение эффективного обогрева при ограниченных ресурсах. Традиционные системы отопления зачастую оказываются энергозатратными, требуют сложной инфраструктуры или не обладают необходимой мобильностью. В этой связи особый интерес представляют альтернативные термодинамические решения, позволяющие реализовать локальный обогрев на основе доступных энергоресурсов. Подбором устройств и оборудования для обогрева подобных помещений занимались Боровков В.М., Калютник А.А., Сергеев В.В, Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н [1-3]. В теоретических работах Дроздова В.Ф. проанализированы как положительные, так и отрицательные стороны воздушного отопления [4]. В работе [5] отмечено, что использование тепловых насосов для обогрева легких конструкций имеют ряд существенных недостатков, это свидетельствует о нецелесообразности применения их в условиях удаленности от основных коммуникаций при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС).

В создавшейся нештатной ситуации одним из главных факторов является время, необходимое для установки палатки и создания внутри ее температуры позволяющей оказывать помощь пострадавшим и проводить регламентированные мероприятия в безопасных условиях.

Одним из перспективных устройств, способных удовлетворить указанные требования, является вихревая трубка Ранка-Хилша — аппарат, реализующий эффект энергоразделения закрученного газового потока без применения движущихся частей и внешних источников энергии. При подаче сжатого газа в цилиндрическую или коническую камеру устройства происходит его температурное разделение: периферийные слои потока нагреваются, а приосевые — охлаждаются. Получаемый горячий поток может быть использован для целей обогрева, что открывает возможности для внедрения вихревых трубок в системы теплоснабжения мобильных объектов.

Методы и принципы исследования. Для решения поставленной задачи были проанализированы как существующие способы, так и устройства для обогрева временных сооружений. В практике для обеспечения комфортной температуры внутри быстровозводимых конструкций применяются различные устройства: электронагревательные элементы, тепловые пушки, печи буржуйки и пр. [6], каждое из которых имеет ряд преимуществ и недостатков, относящихся к условиям применения, а так же транспортировки и эксплуатации. В связи с чем выделяются устройства, которые не требуют дополнительных навыков при установке и собираются и вводятся в эксплуатацию за короткий промежуток времени.

При рассмотрении других способов обогрева особое внимание обращается на обслуживание устройств, для поддержания температуры во временном помещении. При использовании небольших печей возникает ряд проблем, связанных с безопасностью процессов при заправки ее топливом, розжиге, постоянным контролем за уровнем топлива в тепловой пушке, хранением горючих материалов, чисткой зольника и т.п.

Альтернативой распространенным способам является обогрев сооружений при помощи тепловых насосов с использованием вихревого эффекта, предложенный и подробно описанный авторами патента [5]. Однако в автономных условиях он трудно реализуется, т.к. будет необходим источник забора теплого воздуха для последующей его подачи в вихревую трубку через промежуточные теплообменники. Что является проблематичным в условиях ЧС на удаленных территориях.

Применяемые на сегодняшний день способы и устройства для автономного обогрева палаток требуют дополнительного обслуживания, увеличивают время готовности объекта к функционированию и имеют большие габариты и вес, что вызывают сложности с транспортировкой и размещением внутри палатки.

Предложенный авторами в данном исследовании способ обогрева помещения и самого устройства позволяет использовать вихревую трубку с большим КПД даже при отрицательных температурах окружающей среды. В работах Никитина В, Xingwei Liu, Лепеша Г.В. [7-9] подтверждается хороший результат, полученный моделированием таких процессов. Простота конструкции не требует дополнительных навыков сборки и установки, что существенно снижает время запуска. Предлагается использовать компрессор автомобиля, т.к. требуемое давление на входе в вихревую трубку не превышает 6 Атм [10, 11]. Для натурального эксперимента использовалась палатка специальная зимнего назначения с утеплением и габаритными размерами 2,9м*2,9м*2,05м.

Было выполнено моделирование в вычислительной среде ANSYS FLUENT, определено значение по оптимально подаваемому давлению на входе 4,5 Атм. Температура горячего потока на выходе из трубки +83°C, (рис. 1), где представлен результат моделирования с тремя вихревыми трубками. При подаче сжатого газа в вихревую трубку температура горячего потока практически мгновенно выходит на рабочее значение на выходе. Через 20 минут в помещении воздух нагреется до +10°C при -15°C снаружи. Распределение скорости воздуха в расчётной области показано на рисунке 2.

Одна из особенностей вихревых трубок заключается в том, что при подаче сжатого воздуха она выходит на стационарный режим по температуре практически сразу, что делает удобным ее использование. Исключается необходимость использовать вспомогательные устройства [12-14].

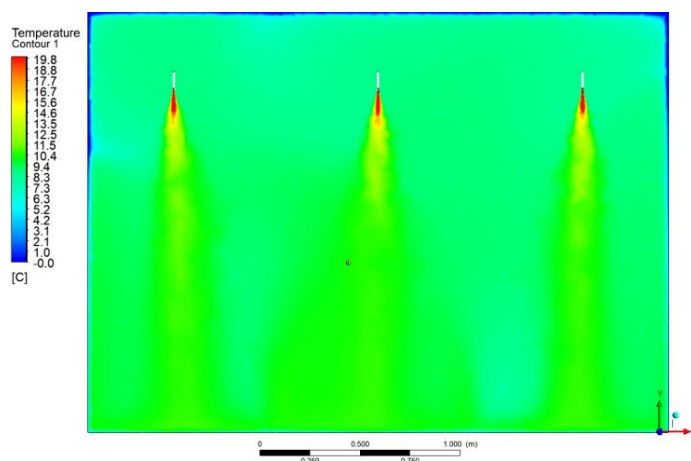


Рис. 1. Поле температуры в установившемся режиме (опыт 3)

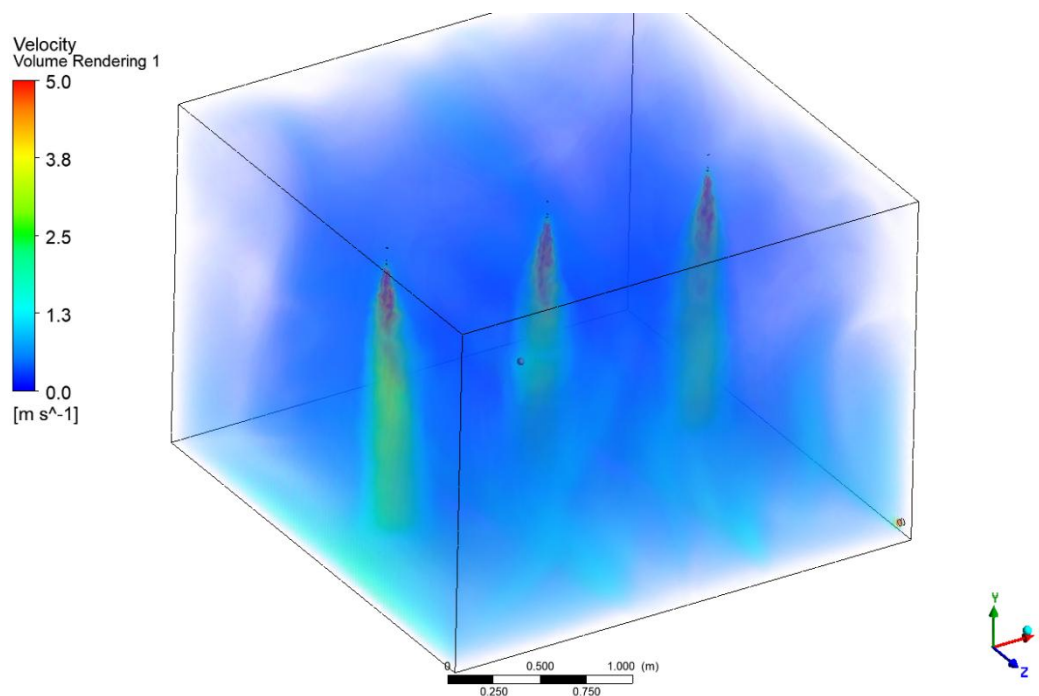


Рис. 2. Распределение скорости воздуха в расчётной области

Расчет тепловой мощности обогрева помещения. Целью теплового расчёта является обеспечение оптимальной тепловой защиты конструкций и обеспечение комфортной температуры внутри временного сооружения. Основными источниками теплопотерь являются: потолок, стены и пол. Наибольшие потери теплоты возникают через стены и пол, расчёты выполняются преимущественно по формулам теплопередачи. Теплопередача – перенос теплоты между двумя теплоносителями, разделёнными поверхностью нагрева. Теплопотери за счет теплопередачи $Q_{огр}$, Вт, рассчитываются через каждое теплоотражающее ограждение отдельно.

Для расчета использовалась палатка габаритные размеры 2,9м*2,9м*2,05м (Д*Ш*В) материал утепления пол: экструдированный пенополистирол, материал утепления стен и потолка эковата 20 мм, наружный, внутренний слой и пол из материала ПВХ ткань.

Для определения требуемой мощности на нагрев помещения был произведен расчет теплопотерь. По результатам численного моделирования с помощью программы ANSYS видно, что установившаяся температура $+10^{\circ}\text{C}$ была достигнута через 20 минут после запуска предлагаемого устройства. Подключение же самой трубки к системе сжатого воздуха занимает несколько минут.

Предложенное устройство и способ по эффективности и другим показателям сравнили с печью «Медиана» и тепловой пушкой «Ресанта» на дизельном топливе.

Печь «Медиана», имеет размеры в транспортном положении (630 x 300 x 500 мм). Основные характеристики - тепловая мощность: 13,1 кВт, вес с сегментами дымохода: 15,2 кг. Тепловая пушка (бренд Ресанта), тепловая мощность 10 кВт, объем бака 12 л, топлива - дизель, вес 14,8 кг.

Термическое сопротивление ограждающих конструкций. Требуемые для расчета характеристики:

- Площадь пола: $8,41 \text{ м}^2$;
- Площадь потолка: $8,41 \text{ м}^2$;
- Площадь стен: $23,78 \text{ м}^2$;
- Теплоизоляция стен 20 мм, коэффициент теплопроводности эковаты $0,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$;
- Теплоизоляция пола (ПВХ) 20 мм, коэффициент теплопроводности экструдированного пенополистерола $0,03 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$;
- Теплоизоляция пола (щепа) 20 мм, коэффициент теплопроводности щепы $0,065 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Определим термическое сопротивление теплопроводности R стенки и дополнительное термическое сопротивление теплоотдаче с наружной стороны R_n , ($\text{м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$). Для расчета термического сопротивления теплопроводности стенки R ($\text{м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$) применяем СП 50.13330.2024:

$$R = \sum \delta_i / \lambda_i, \quad (1)$$

откуда $R = 0,55$.

Дополнительное термическое сопротивление теплоотдаче с наружной стороны сооружения равно $R_n = 1/\alpha$, где α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$. Для ориентировочных расчетов принято: $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$. Тогда, дополнительное термическое сопротивление теплоотдаче $R_n = 0,1 (\text{м}^2\cdot\text{K})/\text{Вт}$. Таким образом, $R = 0,65 (\text{м}^2\cdot\text{K})/\text{Вт}$.

Тепловой поток в окружающую среду определяется по формуле:

$$Q = 1 / R \cdot (t - t_n) \cdot S \cdot (1 + \sum \beta),$$

где:

Q — количество теплоты, теряемого конструкцией одного типа, Вт;

R — термическое сопротивление материала конструкции, $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$;

S — площадь наружного ограждения, м^2 ;

t_v — температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

t_n — наиболее низкая температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

β — добавочные теплопотери, зависящие от ориентации здания.

Таким образом:

$$Q_{\text{стен}} = 1338,56 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{потолка}} = 683,49 \text{ Вт}.$$

Рассчитаем потери теплоты через пол. Требуемые для расчета характеристики:

- Экструдированный пенополистирол ($\lambda_B=0,03$ Вт/(м·К), толщина 20 мм);
- Щепа ($\lambda_B = 0,065$ Вт/(м·К), толщина 20 мм).

Требуемое и минимально допустимое сопротивление теплопередаче полов жилого здания:

$$R_{\text{req}} = 4,67 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт};$$

$$R_{\text{req,min}} = 3,74 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}.$$

Термическое сопротивление теплопередаче утепляющих слоев:

$$R=0,64 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}.$$

Потери теплоты:

$$Q = 450,0 \text{ Вт},$$

$$Q = 571,50 \text{ Вт (щепа)}.$$

Потери теплоты через входную дверь стандартного размера 900x2000 мм ($S = 1,8$ м², термическое сопротивление $R= 0,74$ (м²·К)/Вт):

$$Q = 148,4 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери теплоты:

$$Q = 2619,8 \text{ Вт} \cong 2,6 \text{ кВт},$$

$$Q = 2741,3 \text{ Вт} \cong 2,7 \text{ кВт (щепа)}.$$

Определяем расход теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха поступающего в помещение через систему вентиляции:

$$Q_{\text{вент}} = 0,28 \cdot L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_g - t_n) \cdot F,$$

где:

L – расход удаляемого воздуха, м³/ч, принимаемый для жилых зданий 3 м³/ч на 1 м² площади жилых помещений;

ρ – плотность наружного воздуха, принимаем равной 1 кг/м³;

C – удельная теплоемкость воздуха, принимаем равной 1 кДж/(кг·К);

t_b – температура внутреннего воздуха в помещении, °С;

t_n – температура наружного воздуха, °С;

F – площадь помещения, м².

Тогда:

$$Q = 151,2 \text{ Вт},$$

$$Q = 164,0 \text{ Вт (щепа)}.$$

Общие потери теплоты палатки:

$$Q = 2771 \text{ Вт} \cong 2,8 \text{ кВт},$$

$$Q = 2905,86 \text{ Вт} \cong 2,9 \text{ кВт (щепа)}.$$

Результаты расчета теплопотерь приведены в таблице 1.

Таблица 1. Теплотери через ограждающие конструкции при $t_{вн} +10$, $t_{нар\text{ воз}} -15^{\circ}\text{C}$

Ограждающая конструкция	Теплотери, Вт
Вертикальная (стены)	1338,56 Вт
Горизонтальная (потолок)	683,49 Вт
Горизонтальная (пол): экструдированный пенополистерол	450, Вт
щепы деревянная	571,50 Вт
Двери	148,4 Вт
Инфильтрация	151,20 Вт
Общие для палатки	
Экструдированный пенополистерол	2771,65 Вт \cong 2,8 кВт
Щепы	2893,15 Вт \cong 2,9 кВт

Варианты расположения устройств внутри объекта приведены на рисунках 3-5.

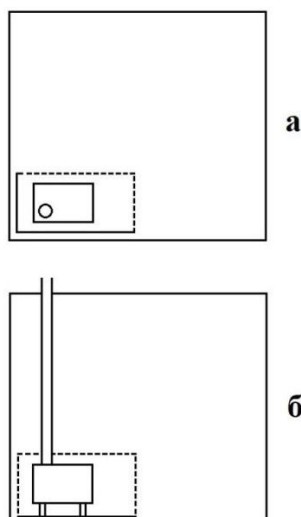


Рис. 3. Печь Медиана: вид сверху (а), вид спереди (б)

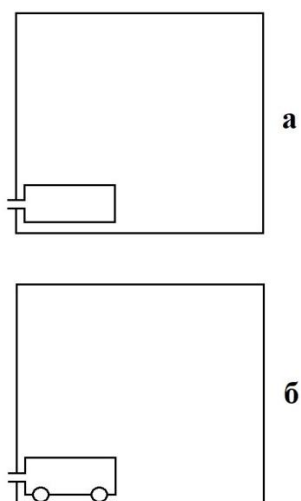


Рис. 4. Тепловая пушка: вид сверху (а), вид спереди (б)

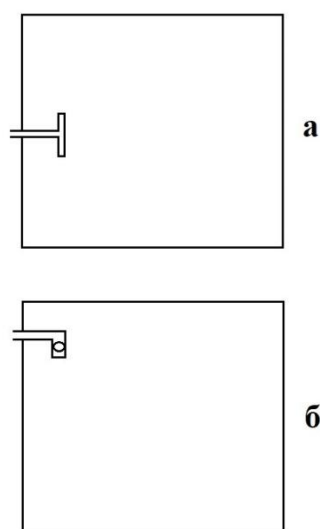


Рис. 5. Предлагаемое устройство: вид сверху (а), вид спереди (б)

Выводы. Проанализировав выбранные для сравнения способы нагрева временных помещений, можно сделать вывод, что для конструкций быстро возводимых сооружений наиболее эффективный способ обогрева - использование вихревых трубок. Данный способ обогрева может быть использован при ЧС различного характера в холодное время года в отдаленных районах, в том числе с отсутствием источников электричества. Автономность обуславливается реализацией предлагаемого способа и конструкцией самого устройства, а так же конструкцией быстровозводимого сооружения. Несмотря на ограниченную термодинамическую эффективность, её уникальные эксплуатационные характеристики оправдывают применение в специфических условиях: полевые лагеря и временные постройки; транспортные средства с пневматической системой; объекты в удалённых регионах без стабильной электросети.

Для расширения сферы применения необходимо дальнейшее совершенствование конструкций вихревых трубок с акцентом на повышение КПД [15-16]. Термодинамический анализ подтверждает, что оптимизация параметров потока и геометрии камеры энергоразделения может существенно улучшить показатели обогрева при сохранении ключевых преимуществ технологии [17-18].

Сравнение с печью “Медиана” показывает проигрыш сжигающего устройства, поскольку требуется дополнительное время для ее сборки не менее 40 минут, а так же отчуждение достаточно большого пространства для ее установки и обязательной системы дымохода, установка защитных экранов на стены и пол состоящие из листов металла и базальтового картона, превышающие габаритные размеры печи на 0,5 метра, а так же требуется соблюдение безопасного расстояния перед топкой не менее 1,25 метра что существенно сокращает используемую площадь палатки. Печь требует постоянного ее обслуживания и контроля.

Тепловая пушка так же имеет не малые габариты, если рассматривать вариант расположения ее внутри палатки. При установке снаружи требует специального патрубка для ввода горячего потока в помещение, что приведет к дополнительным теплопотерям. Оба варианта используют топливо, т.е. необходимо учитывать высокие риски при обслуживании.

Использование вихревой трубки не требует дополнительного обслуживания, все устройство монтируется в течение 10 минут и имеет хорошие показатели безопасности. За счет конструктивного исполнения и малых габаритных размеров устанавливается под потолком, не занимая полезное пространство. Не требует дополнительного места поскольку не имеет сильно раскаленных частей.

Рассмотренный при расчете теплопотерь вариант применения теплоизоляции пола с использованием натуральной щепы немного уступает в теплоизоляционных показателях, однако имеет ряд преимуществ: это экологически чистый и безопасный материал, имеющий низкую стоимость, т.к. является отходом переработки древесины, в теплом помещении выделяет фитонциды с целым спектром положительных эффектов, благоприятно влияющих на присутствующих, способствует релаксации. Заслуживает внимания простота укладки материала и возможность необязательного его сбора при демонтаже палатки, поскольку он быстро разлагается естественным способом, не загрязняя окружающую среду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровков, В. М. Ремонт теплотехнического оборудования и тепловых сетей: учебник для образовательных учреждений / В. М. Боровков, А. А. Калюттик, В. В. Сергеев. – Москва: Академия, 2015. – 399 с.
2. Журиха, А. М. Воздушное отопление помещений / А. М. Журиха // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – № 2(4). – С. 71-74.
3. Пиралишвили, Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения: монография / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. А. И. Леонтьева. – Москва: УНПП «Энергомаш», 2000. – 412 с.
4. Дроздов, В. Ф. Отопление и вентиляция: учебное пособие / В. Ф. Дроздов. – М.: Высшая школа, 2014. – 264 с.
5. Патент № 2677310 С2 Российская Федерация, МПК F25B 30/02, F25B 9/04. Способ и устройство для обогрева объектов: № 2016132330: заявл. 04.08.2016: опублик. 16.01.2019 / В. А. Сафонов, Н. И. Варминская, С. Д. Иванов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет". – EDN PFONOA.
6. Магомедов, А. Дж. Об одной революции в быту населения Дагестана: железные печки с. Харбук / А. Дж. Магомедов, Х. А. Юсупов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – №7 (109). – С. 208-212.
7. Лепеш, Г. В. Моделирование процесса тепломассопереноса в программной среде Ansys/Fluent при дифференцированном отоплении подземного перехода / Г. В. Лепеш, Т. В. Потемкина, Г. А. Спроге // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 4 (34). – С. 66–69.
8. Nikitin, V. Overview of numerical methods for simulating Ranque-Hilsch effect within vortex tubes / V. Nikitin, P. Bogdevicius, M. Bogdevicius // Science – Future of Lithuania, Mokslas – Lietuvos Ateitis. – 2015. – V. 7. – No 5. – P.571-576.
9. Xingwei, L. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube / L. Xingwei, L. Zhongliang // Applied Thermal Engineering. – 2014. – V. 67. – Iss. 1–2. – P.494-506.
10. Енютина, Т. А. Использование эффекта Ранка-Хилша в практике ликвидации чрезвычайных ситуаций / Т. А. Енютина, Л. В. Кулагина, М. М. Гафуров // Справочник. Инженерный журнал. – 2023. – № 11(320). – С. 50-54. – DOI 10.14489/hb.2023.11.pp.050-054.
11. Патент № 2828940 С1 Российская Федерация, МПК А62С 33/00, F16L 59/16. Способ утепления рукавного разветвления в условиях низких температур, устройство для его осуществления и теплоизоляционный чехол устройства: № 2024101780: заявл. 25.01.2024: опублик. 21.10.2024 / Т. А. Енютина, Т. А. Кулагина, С. Г. Марченкова [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет". – EDN LBGVJM.
12. Гафуров, М. М. Перспективные применения вихревых трубок Ранка-Хилша при ликвидации последствий аварий / М. М. Гафуров // Охрана окружающей среды и устойчивое развитие территорий: Сборник материалов Международного экологического форума, Биробиджан, 29–30 мая 2025 года. – Биробиджан: ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2025. – С. 20-24. – EDN NFBXPU.

13. Енютина, Т. А. Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности / Т. А. Енютина, Л. В. Кулагина. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – 190 с.
14. Демиденко, Н. Д. Оптимальное управление процессом разделения с ограничениями на потоки / Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина, А. Г. Никифоров // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 159-170. – DOI 10.17516/1999-494X-0125.
15. Кулагина, Т. А. Теоретические основы защиты окружающей среды / Т. А. Кулагина, Л. В. Кулагина. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – 364 с. – ISBN 978-5-7638-3678-3.
16. Кулагина, Л. В. Изучение тепломассообменных процессов в технологических печах / Л. В. Кулагина // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 190-206.
17. Экология техносферы: учебное пособие / В. В. Гутенев, Т. А. Кулагина, Л. В. Кулагина [и др.]. – Москва: Издательство "Маджента", 2008. – 468 с.
18. Демиденко, Н. Д. Математическое описание процессов в технологических печах / Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина // Решетневские чтения. – 2005. – Т. 1. – С. 238-239.

REFERENCES LIST

1. Borovkov, V. M. Remont teplotekhnicheskogo oborudovaniia i teplovykh setei: uchebnik dlia obrazovatelnykh uchrezhdenii / V. M. Borovkov, A. A. Kaliutik, V. V. Sergeev. – Moskva: Akademiia, 2015. – 399 s.
2. Zhurikha, A. M. Vozdushnoe otoplenie pomeshchenii / A. M. Zhurikha // Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriia. – 2017. – № 2(4). – S. 71-74.
3. Piralishvili, Sh. A. Vikhrevoi effekt. Eksperiment, teoriia, tekhnicheskie resheniia: monografiia / Sh. A. Piralishvili, V. M. Poliaev, M. N. Sergeev; pod red. A. I. Leonteva. – Moskva: UNPTs «Energomash», 2000. – 412 s.
4. Drozdov, V. F. Otoplenie i ventilatsiia: uchebnoe posobie / V. F. Drozdov. – M.: Vysshaia shkola, 2014. – 264 s.
5. Patent № 2677310 C2 Rossiiskaia Federatsiia, MPK F25B 30/02, F25B 9/04. Sposob i ustroistvo dlia obogreva obiektov: № 2016132330: zaiavl. 04.08.2016: opubl. 16.01.2019 / V. A. Safonov, N. I. Varminskaia, S. D. Ivanov; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia Sevastopolskii gosudarstvennyi universitet. – EDN PFONOA.
6. Magomedov, A. Dzh. Ob odnoi revoliutsii v bytu naseleniia Dagestana: zheleznye pechki s. Kharbuk / A. Dzh. Magomedov, Kh. A. Iusupov // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2021. – №7 (109). – S. 208-212.
7. Lepesh, G. V. Modelirovanie protsessa teplomassoperenosa v programmnoi srede Ansys/Fluent pri differentsirovannom otoplenii podzemnogo perekhoda / G. V. Lepesh, T. V. Potemkina, G. A. Sproge // Tekhniko tekhnologicheskie problemy servisa. – 2015. – № 4 (34). – S. 66–69.
8. Nikitin, V. Overview of numerical methods for simulating Ranque-Hilsch effect within vortex tubes / V. Nikitin, P. Bogdevicius, M. Bogdevicius // Science – Future of Lithuania, Mokslas – Lietuvos Ateitis. – 2015. – V. 7. – No 5. – P.571-576.
9. Xingwei, L. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube / L. Xingwei, L. Zhongliang // Applied Thermal Engineering. – 2014. – V. 67. – Iss. 1–2. – P.494-506.
10. Eniutina, T. A. Ispolzovanie effekta Ranka-Khilsha v praktike likvidatsii chrezvychainykh situatsii / T. A. Eniutina, L. V. Kulagina, M. M. Gafurov // Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal. – 2023. – № 11(320). – S. 50-54. – DOI 10.14489/hb.2023.11.pp.050-054.
11. Patent № 2828940 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK A62C 33/00, F16L 59/16. Sposob utepleniia rukavnogo razvetvleniia v usloviiakh nizkikh temperatur, ustroistvo dlia ego osushchestvleniia i teploizoliatsionnyi chekhol ustroistva: № 2024101780: zaiavl. 25.01.2024: opubl. 21.10.2024 / T. A. Eniutina, T. A. Kulagina, S. G. Marchenkova [i dr.]; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia Sibirskii federalnyi universitet. – EDN LBGVJM.
12. Gafurov, M. M. Perspektivnye primeneniia vikhrevykh trubok Ranka-Khilsha pri likvidatsii posledstviu avarii / M. M. Gafurov // Okhrana okruzhaiushchei srede i ustoichivoe razvitie territorii: Sbornik materialov Mezhdunarodnogo ekologicheskogo foruma, Birobidzhan, 29–30 maia 2025 goda. – Birobidzhan: PGU im. Sholom-Aleikhema, 2025. – S. 20-24. – EDN NFBXPU.
13. Eniutina, T. A. Raschet i proektirovanie sistem obespecheniia bezopasnosti / T. A. Eniutina, L. V. Kulagina. – Krasnoarsk: Sibirskii federalnyi universitet, 2022. – 190 s.

14. Demidenko, N. D. Optimalnoe upravlenie protsessom razdeleniia s ogranicheniiami na potoki / N. D. Demidenko, L. V. Kulagina, A. G. Nikiforov // Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. – 2019. – Т. 12, № 2. – S. 159-170. – DOI 10.17516/1999-494X-0125.
15. Kulagina, T. A. Teoreticheskie osnovy zashchity okruzhaiushchei sredy / T. A. Kulagina, L. V. Kulagina. – Krasnoyarsk: Sibirskii federalnyi universitet, 2017. – 364 s. – ISBN 978-5-7638-3678-3.
16. Kulagina, L. V. Izuchenie teplomassoobmennykh protsessov v tekhnologicheskikh pechakh / L. V. Kulagina // Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. – 2014. – Т. 7, № 2. – S. 190-206.
17. Ekologiya tekhnosfery: uchebnoe posobie / V. V. Gutenev, T. A. Kulagina, L. V. Kulagina [i dr.]. – Moskva: Izdatelstvo Madzhenta, 2008. – 468 s.
19. Demidenko, N. D. Matematicheskoe opisanie protsessov v tekhnologicheskikh pechakh / N. D. Demidenko, L. V. Kulagina // Reshetnevskie chteniia. – 2005. – Т. 1. – S. 238-239.

Поступила в редакцию 26.11.2025 г., рекомендована к изданию 27.01.2026 г.

THERMAL ENGINEERING ASPECTS OF USING THE RANQUE-HILSCH VORTEX TUBE IN HEATING SYSTEMS FOR MOBILE STRUCTURES

Gafurov M.M., Kulagina T.A.

The relevance of the work is due to the need for technical and technological solutions that provide effective and safe heating of quickly erected temporary structures. In the event of natural or man-made emergencies in remote and hard-to-reach areas during the cold season, it is necessary to provide assistance and create conditions for victims that allow them to receive first aid and other necessary measures without additional risk to their lives at low temperatures. The proposed method involves using a Rankine-Hilsch vortex tube to heat short-term autonomous structures. This method allows for the rapid creation of comfortable conditions in temporary structures.

Keywords: Rank-Hilsh tube, vortex effect, temporary structures.

Гафуров Марат Мисютович

аспирант ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет»,
Российская Федерация, г. Красноярск.
E-mail: gmara2021@mail.ru

Gafurov Marat Misiutovich

Postgraduate Student of Siberian Federal University,
Russian Federation, Krasnoyarsk.
ORCID: 0009-0005-4925-8728

Кулагина Татьяна Анатольевна

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной и экологической безопасности ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет»,
Российская федерация, г. Красноярск.
E-mail: tak.sfu@gmail.com

Kulagina Tatiana Anatolevna

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Technosphere and Environmental Safety of Siberian Federal University,
Russian Federation, Krasnoyarsk.
ORCID: 0000-0003-2601-9570

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАСЫЩЕНИЕ ПОРИСТОЙ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ ПОТОКОМ СО СТРУКТУРОЙ ИДЕАЛЬНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ

© 2026 Куликова О.В., Ряжских В.И.

На основе подхода Дарси-Бринкмана для течения вязкой несжимаемой жидкости в пористых средах и однопараметрического представления о локальном температурном равновесии предложена модель проникновения ньютоновской среды в условиях гравитационной движущейся силы в полуограниченную пористую изотропную среду. Для медленного просачивания жидкости гидродинамическая подзадача упрощена с помощью линеаризации поля скоростей применением режима идеального вытеснения в рамках линейной фильтрации. Начально-краевая задача сформулирована для двух вариантов постановки краевого условия на «свободной» поверхности пористого слоя: постоянная температура и её импульсное изменение. Получены аналитические решения в квадратурах. Приведен пример расчета, иллюстрирующий влияние неизотермичности потока «горячей» среды в «холодную» пористую структуру на время просачивания.

Ключевые слова: ньютоновская жидкость, пористая среда, неизотермичность, фильтрация, температура.

Введение. Перенос теплоты с жидкостными потоками в пористых структурах имеет важное значение в различных прикладных приложениях – насыщение матриц связующим материалом [1], пропитка проницаемых материалов в химической промышленности [2], транспирационное охлаждение термонапряженных элементов технических систем [3], нивелирование загрязнителей грунтов [4] и др.

Реальная пористая среда имеет, как правило, сложную стохастическую структуру, поэтому при ее физическом моделировании используются упрощенные представления. Например, в [5] эта структура представляется плотной упаковкой монодисперсных сфер, в которой мигрирующая среда полностью заполняет межсферическое пространство. При этом предполагается недеформируемость пористого скелета. При выполнении таких условий гидродинамика пористого слоя представляется уравнением Дарси-Бринкмана-Форчхеймера для несжимаемой вязкой жидкости, подчиняющейся реологическому закону Ньютона [6].

В случае медленного просачивания жидкости сквозь пористый слой, температура жидкости и пористой матрицы локально быстро выравнивается, поэтому вполне оправдано применение однотемпературной модели, которая при постоянных теплофизических параметрах обычно записывается в консервативной форме [7]:

$$\sigma \frac{\partial t}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{v}t) = a_{eff} \nabla^2 t, \quad (1)$$

где:

$$\sigma = \frac{\varepsilon (\rho c_p)_f + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}; \quad a_{eff} = \frac{\varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s}{\lambda_f};$$

τ – время; t – локальная температура; \vec{v} – вектор скорости жидкости; ε – пористость слоя; $\rho_{f,s}$; $c_{p,f,s}$; $\lambda_{f,s}$ – плотность, массовые теплоемкости и теплопроводности жидкости и пористой среды; a_{eff} – «эфффективная» температуропроводность.

Наиболее часто в пористых средах рассматривается тепло-и массообмен при напорном течении жидкости [8]. Однако в последнее время вызывают практический интерес задачи просачивания в пористых средах при неизотермических условиях, например, при разливах углеводородных жидкостей [9, 10], однако по-прежнему тепловой подзадаче уделяется не так много места.

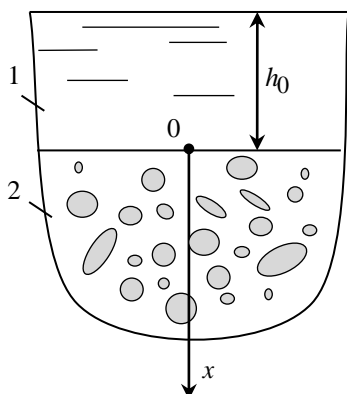


Рис. 1. Расчетная схема: 1 – слой жидкости; 2 – пористая среда

В связи с этим целью данной статьи является разработка методики для оценки изменения глубины неизотермического проникновения жидкостного потока в пористой среде в условиях гравитационной движущей силы.

Математическая модель. Рассматривается полуограниченный слой пористой среды (рис. 1) с проницаемостью k , над которым в начальный момент времени расположен слой h_0 вязкой несжимаемой жидкости с динамической вязкостью μ_f .

Теплофизические характеристики пористой среды и слоя жидкости полагаются постоянными, а геометрия системы одномерная. Рассматривается ламинарный режим фильтрации, подчиняющийся закону Дарси. В силу этого уравнение неразрывности принимает вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

означающее постоянство скорости жидкости по глубине пористого слоя. Тогда из уравнения Дарси-Бринкмана-Форчхеймера с учетом (2) следует:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial \tau} = g - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu_f}{\rho_f} \frac{u}{k}, \quad (3)$$

где слагаемым Форчхеймера можно пренебречь из-за малой скорости фильтрации. Если жидкость и пористая матрица несжимаемы [11], то:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

Из (4) следует, что:

$$p(x, \tau) = a(\tau)x + b(\tau),$$

причем $b(\tau) = \rho g (h_0 - u\tau)$, но $a(\tau)x \ll b(\tau)$, поэтому в первом приближении можно положить $\partial p / \partial x \approx 0$. Такая линеаризация трансформирует (3) в уравнение:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{du}{d\tau} = g - \frac{\mu_f}{\rho_f} \frac{u}{k},$$

с начальным условием:

$$u(0) = 0,$$

решение которого имеет вид:

$$U(\theta) = (\rho_f g k / \mu_f) \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon \mu_f}{\rho_f k} \tau\right) \right]. \quad (5)$$

Т.к. для сравнительно небольших времен и значениях коэффициента проницаемости плотных пористых слоев $k = 10^{-15} \div 10^{-18} \text{ м}^2$ [12] из (5) следует, что:

$$u \approx \rho_f g k / \mu_f.$$

Это обстоятельство существенно упрощает уравнение конвективного теплопереноса (1):

$$\sigma \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} + u \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = a_{eff} \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Будем полагать для определенности, начальная температура пористой матрицы:

$$t(x, 0) = t_c, \quad (7)$$

а температура жидкости на поверхности пористого слоя составляет:

$$t(0, \tau) = t_h, \quad (8)$$

причем пусть $t_c < t_h$. На глубине выполняется условие отсутствия теплового потока:

$$\frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

Начально-краевая задача (6) – (9) представлена в безразмерном виде:

$$\frac{\partial T(X, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial T(X, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial^2 T(X, \theta)}{\partial X^2}; \quad (10)$$

$$T(X, 0) = 0; \quad (11)$$

$$T(0, \theta) = 1; \quad (12)$$

$$\frac{\partial T(\infty, \theta)}{\partial X} = 0, \quad (13)$$

где $\theta = \tau / \bar{\tau}$; $\bar{\tau} = \rho_f k / (\varepsilon \mu_f)$; $X = x / \bar{x}$; $T(X, \theta) = [t(x, \tau) - t_c] / (t_h - t_c)$; $\tau = \sigma a_{eff} / u^2$; $\bar{x} = a_{eff} / u$.

Анализ. Т.к. система уравнений (10–13) линейна, то ее решение может быть получено в аналитическом виде, например, односторонним интегральным преобразованием Лапласа по переменной θ :

$$T(X, \theta) = \begin{cases} 1, & X = 0 \\ \frac{X}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{X}{2}\right) \int_0^1 (\theta - \xi)^{-3/2} \exp\left[-\frac{(\theta - \xi)}{4} - \frac{X^2}{4(\theta - \xi)}\right] d\xi, & X > 0 \end{cases} \quad (14)$$

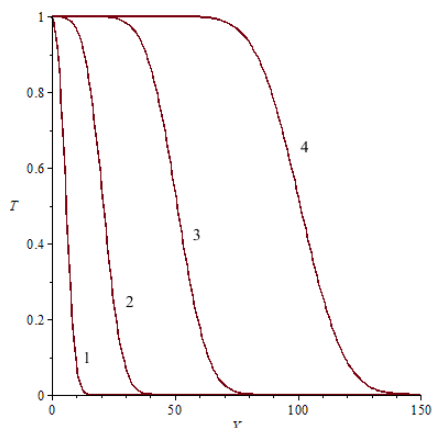


Рис. 2. Безразмерные профили температур в пористом слое по глубине при различных θ :
1 – 5; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100

Тогда:

$$T(X, \theta) = \frac{X}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{X}{2}\right) \left[\int_0^1 \xi^{-3/2} \exp\left(-\frac{\xi}{4} - \frac{X^2}{4\xi}\right) d\xi - \int_0^1 1(\theta - \eta - \theta_0) \eta^{-3/2} \exp\left(-\frac{\eta}{4} - \frac{X^2}{4\eta}\right) d\eta \right] \quad (15)$$

Результаты расчета с использованием полученного решения (15) (рис. 3) иллюстрируют динамику трансформации температуры по глубине пористого слоя с постепенным нивелированием теплового воздействия в виде затухающей тепловой волны.

Реализация методики. Оценим влияние неизотермичности на время проникновения легкой нефти в минеральную почву с толщиной разлива $h = 0,1\text{ м}$ с температурой $t_h = 40^\circ\text{C}$ (температура приповерхностного слоя почвы $t_c = 20^\circ\text{C}$). За масштаб времени выбрано время поглощения слоя нефти с температурой 20°C с поверхности грунта. Теплофизические характеристики из [12] таковы: $\rho_s = 2800\text{ кг/м}^3$; $\lambda_s = 1,84\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $k = 10^{-13}\text{ м}^2$; $\rho_f = 830\text{ кг/м}^3$; $c_{pf} = 1900\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$;

Расчеты по (14) показывают (рис. 2), что температура по глубине пористого слоя неоднородна. Размытость хвостовых зон профилей температур при различных безразмерных временах свидетельствует о существенном влиянии эффективной теплопроводности системы жидкость-пористая матрица.

Практический интерес также представляет случай, когда на свободной поверхности пористого слоя температура изменяется импульсно, т.е. условие (12) трансформируется в:

$$T(0, \theta) = 1(\theta) - 1(\theta - \theta_0),$$

где $1(\dots)$ – функция Хэвисайда; θ_0 – относительное, время длительности импульса.

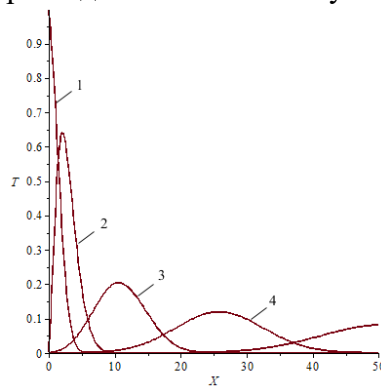


Рис. 3. Безразмерные профили температур в пористом слое по глубине для импульсного режима ($\theta_0 = 2$) при различных значениях θ :
1 – 2,5; 2 – 10; 3 – 25; 4 – 500

$c_{p_s} = 963 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\varepsilon = 0,4$; $\lambda_f = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (в указанном диапазоне температур теплофизические параметры изменяются незначительно). Примем гиперболическую форму зависимости динамической вязкости легкой нефти от температуры $\mu_f = \alpha t^{-\beta}$, где α , β - константы, которые будем определять по двум реперным точкам: $\mu_{f_1} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ при $t_1 = 50^\circ\text{C}$ и $\mu_{f_2} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ при $t_2 = 50^\circ\text{C}$, тогда $\beta = (\ln \mu_{f_1} - \ln \mu_{f_2}) / (\ln t_1 - \ln t_2)$ и $\mu_{f_1} = \alpha t_1^{-\beta}$, в итоге:

$$\mu_f = 0,161 t^{-1,274}. \quad (16)$$

Как следует из (16) $\mu(t_c) = 3,535 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, поэтому $u_c = 2,303 \cdot 10^{-7} \text{ м}/\text{с}$ и соответственно время пропитки слоя составит $\tau_c = h / (3600 \varepsilon u_c) = 301,4 \text{ час}$. Расчет параметров модели таков: $\sigma = 1,426$; $a_{eff} = 7,381 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ и поэтому $\bar{\tau} = 1,987 \cdot 10^7 \text{ с}$, $\bar{x} = 3,204 \text{ м}$. Это дает основание найти $\theta_k = \tau_c / \bar{\tau} = 1,52 \cdot 10^{-5}$ и по (16) вычислить $X = 0,02$ из условия $T(X, \theta_k) \approx 0$ с точностью в 1%, что означает охлаждение потока нефти до температуры почвы уже на глубине $\approx 6,4 \text{ см}$, при этом полная глубина проникновения потока в грунт составляет 25 см . Т.к. среднеинтегральное значение температуры есть $22,56^\circ\text{C}$, то из (16) следует, что при данной температуре $\mu_f = 3,032 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и следовательно $u_h = 2,685 \cdot 10^{-7} \text{ м}/\text{с}$, поэтому $\tau_h = 258,6 \text{ час}$, т.е. время проникновения с учетом неизотермичности уменьшится приблизительно на 14%. В данном случае такая оценка важна при принятии оперативности мер для нивелирования экологических последствий разливов углеводородных сред.

Заключение. Показано, что учет неизотермичности проникновения «горячего» потока в «холодную» матрицу пористого слоя даже при небольшой разнице температур существенно влияет на скорость процесса. В различных прецизионных технологиях это может оказаться решающим фактором при оценке качества финишной продукции. В связи с этим предложенная математическая модель и на ее основе методика позволяют сделать необходимую оценку величины температурной неоднородности и ее воздействие на основные параметры процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Narta, M. Additive manufacturing of metal matrix composites / M. Narta, P. Agrawal // Materials&Design. – 2025. – V. 252. – P. 113609.
2. Supercritical CO2-assisted impregnation/ deposition of polymeric materials with pharmaceutical, nutraceutical, and biomedical applications: A review (2015-2021) / N.D. Machado, J.E. Mosquera, R.E. Martini [et al.] // The Journal of Supercritical Fluids. – 2022. – V. 191. – P. 105763
3. Research progress of transpiration cooling for aircraft thermal protection/ Q. Mi, S.H. Yi, D.D. Gang [et al.] // Appl. Thermal Engineering. – 2004. – V. 236. – part A. – P. 121360.
4. Experimental and numerical investigation on maspilled oil migration and contamination characteristics in freezing soils / W. Pei, Z. Ye, M. Zhang [et al.] // Geoderma. – 2025. – V. 457. – P. 117300.
5. Delavar, M. A. Using porous for heat transfer enhancement in heat exchangers review / M. A. Delavar, M. I. Azimi // J. of Eng. Sci. and Technology Review. – 2013. – V. 6. – №1. – P. 14-16.
6. Caucao, S. A mixed FEM for the coupled Brinkman-Forchheimer / Darcy problem / S. Caucao, M. Discacciati // Applied Numerical Mathematical. – 2023. – V. 190. – P. 138-154.

7. Wendl, M. Theoretical foundations of conduction and convection heat transfer / M. Wendl. – Saint Louis. Washington University, 2012. – 227 p.
8. Nield, D. A. Convection in Porous Media / D. A. Nield, A. Bejan. – NY: Springer, 2006. – 654 p.
9. Ichikawa, Y. Transport Phenomena in Porous media. Aspects of Micro/Macro Behaviour / Y. Ichikawa, A. P. S. Selvadurai. – NY: Springer Heidelberg, 2012. – 382 p.
10. Математическое моделирование процессов распространения загрязняющего вещества в почвогрунтах и атмосфере при его аварийном разливе / Ю. Н. Матвеев, Б. И. Масленников, К. А. Карельская, Н. А. Стукалова // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 5(36). – С. 83. – EDN XCMQND.
11. Zimmermann, R. W. Fluid flow in porous media: Volume 5 / R. W. Zimmermann. – New Jersey: World Scientific Publishing. Europ. Ltd., 2018. – 220 p.
12. Купцов, С. М. Теплофизические свойства пластовых жидкостей и горных пород нефтяных месторождений / С. М. Купцов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 205 с.

REFERENCES LIST

1. Narta, M. Additive manufacturing of metal matrix composites / M. Narta, P. Agrawal // Materials&Design. – 2025. – V. 252. – P. 113609.
2. Supercritical CO₂-assisted impregnation/ deposition of polymeric materials with pharmaceutical, nutraceutical, and biomedical applications: A review (2015-2021) / N.D. Machado, J.E. Mosquera, R.E. Martini [et al.] // The Journal of Supercritical Fluids. – 2022. – V. 191. – P. 105763
3. Research progress of transpiration cooling for aircraft thermal protection/ Q. Mi, S.H. Yi, D.D. Gang [et al.] // Appl. Thermal Engineering. – 2004. – V. 236. – part A. – P. 121360.
4. Experimental and numerical investigation on maspilled oil migration and contamination characteristics in freezing soils / W. Pei, Z. Ye, M. Zhang [et al.] // Geoderma. – 2025. – V. 457. – P. 117300.
5. Delavar, M. A. Using porous for heat transfer enhancement in heat exchangers review / M. A. Delavar, M. I. Azimi // J. of Eng. Sci. and Technology Review. – 2013. – V. 6. – №1. – P. 14-16.
6. Caucao, S. A mixed FEM for the coupled Brinkman-Forchheimer / Darcy problem / S. Caucao, M. Discacciati // Applied Numerical Mathematical. – 2023. – V. 190. – P. 138-154.
7. Wendl, M. Theoretical foundations of conduction and convection heat transfer / M. Wendl. – Saint Louis. Washington University, 2012. – 227 p.
8. Nield, D. A. Convection in Porous Media / D. A. Nield, A. Bejan. – NY: Springer, 2006. – 654 p.
9. Ichikawa, Y. Transport Phenomena in Porous media. Aspects of Micro/Macro Behaviour / Y. Ichikawa, A. P. S. Selvadurai. – NY: Springer Heidelberg, 2012. – 382 p.
10. Математическое моделирование процессов распространения загрязняющего вещества в почвогрунтах и атмосфере при его аварийном разливе / Ю. Н. Матвеев, Б. И. Масленников, К. А. Карельская, Н. А. Стукалова // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 5(36). – С. 83. – EDN XCMQND.
11. Zimmermann, R. W. Fluid flow in porous media: Volume 5 / R. W. Zimmermann. – New Jersey: World Scientific Publishing. Europ. Ltd., 2018. – 220 p.
12. Купцов, С. М. Теплофизические свойства пластовых жидкостей и горных пород нефтяных месторождений / С. М. Купцов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 205 с.

Поступила в редакцию 28.11.2025 г., рекомендована к изданию 02.02.2026 г.

NON-ISOTHERMAL SATURATION OF A POROUS SEMI-BOUNDED ISOTROPIC MEDIUM WITH A FLOW WITH A PERFECT DISPLACEMENT STRUCTURE

Kulikova O.V., Riazhskikh V.I.

Based on the Darcy-Brinkman approach for viscous incompressible fluid flow in porous media and a one-parameter representation of local temperature equilibrium, a model of penetration of a Newtonian fluid under gravitational driving force into a semi-bounded porous isotropic medium is proposed. For slow fluid permeation, the hydrodynamic subproblem is simplified by linearizing the velocity field using the ideal plug flow regime within a linear filtration framework. The initial-boundary value problem is formulated for two boundary condition formulations on the "free" surface of the porous layer: constant temperature and its pulsed change. Analytical solutions are obtained in quadratures. A calculation example is given illustrating the effect of non-isothermal flow of a "hot" medium into a "cold" porous structure on the permeation time.

Keywords: Newtonian fluid, porous medium, non-isothermal flow, filtration, temperature.

Куликова Оксана Валерьевна

старший преподаватель кафедры нефтегазового оборудования и транспортировки ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
Email: ryazhskihav@bk.ru

Kulikova Oksana Valerevna

Senior Lecturer at Department of Oil and Gas Equipment and Transportation of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.
ORCID: 0009-0008-4553-0052

Ряжских Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
Email: ryazhskih_vi@mail.ru

Riazhskikh Viktor Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.
ORCID: 0000-0002-2834-3000

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

© 2026 Бирюков А.Б., Полхов С.В.

В работе рассматриваются возможности использования методов регрессионного анализа для оценки эффективности работы объектов генерации тепловой энергии. На основе фактических данных о потреблении природного газа, а также фактических погодных данных были построены модели зависимости потребления топлива от погодных условий для трёх отопительных котельных. На основе разработанных моделей был проведен анализ общей эффективности работы котельных. Также сделаны выводы о применимости моделей для прогнозирования потребления топливных ресурсов.

Ключевые слова: котельная, потребление газа, температура, линейная регрессия, зависимая и независимая переменная, уравнение регрессии.

Введение. Эффективность котельной в определенный момент времени может зависеть от значительного числа факторов. При этом технико-экономические параметры эффективности, такие как КПД установленных котельных агрегатов (проектный или фактический), удельные расходы энергоресурсов на выработку тепловой энергии или себестоимость производства единицы тепловой энергии могут в значительной степени изменяться под действием независимых факторов, а именно, погодных условий.

Определение расчетных нагрузок, потребления тепловой энергии потребителями основано на нормативных данных температур наружного воздуха. В г. Донецк на сегодняшний день существует тенденция как к повышению средних температур отопительного периода, так и к увеличению частоты погодных аномалий (аномально теплые периоды, резкие перепады температур и т.д.). При этом фактические показатели работы котельной (выработка тепловой энергии, потребление природного газа) будет достаточно существенно отличаться от расчетных показателей, ориентированных на нормативные климатические данные. И если для первоначального проектирования объектов генерации тепловой энергии ориентирование на нормативные данные обосновано, то для других целей и задач такого подхода может быть недостаточно. Определение эффективности работы котельной, разработка энергосберегающих мероприятий, определение показателей экономической эффективности уже проведенных энергосберегающих мероприятий может потребовать более тщательного анализа именно фактических данных.

Помимо этого, объекты генерации тепловой энергии, в особенности с устаревшим оборудованием и низким уровнем автоматизации регулирования процессов отпуска тепловой энергии, при различных погодных условиях могут демонстрировать различную эффективность. Как степень загрузки котельной, так и частота и амплитуда её колебаний, могут оказать существенное влияние на КПД котлов и средневзвешенный коэффициент полезного действия котельной. В этом случае, зависимость показателей работы от фактических погодных условий принимает индивидуальный характер для каждой конкретной котельной.

Одним из основных параметров, определяющих эффективность работы котельной, является потребление энергоресурсов. В г. Донецк подавляющее большинство котельных

являются газовыми. При этом узлы учета природного газа на котельных снабжены оборудованием, позволяющим достаточно детально контролировать его фактическое потребление с различной периодичностью (часовое, суточное потребление). Общее потребление природного газа определяет средневзвешенный коэффициент полезного действия котельной, а также ряд других показателей эффективности.

Определить зависимость потребления природного газа котельной от фактических погодных условий и построить линию эффективности позволяет регрессионный анализ.

Регрессионные модели часто используются в теплоэнергетике для построения линий энергоэффективности объектов генерации и потребителей тепловой энергии, а также составления прогнозов изменения различных показателей работы котельных, ТЭЦ и т.д. В работах [1-3] представлены примеры применения регрессионного анализа в системах централизованного теплоснабжения для оценки текущей и прогнозируемой эффективности объектов генерации тепловой энергии, а также комплекса различных потребителей.

В работах [4, 5] представлены методы применения регрессионного анализа для оценки влияния различных технических параметров на общую эффективность работы котельных.

В работе [6] представлено использование современных методов линейного регрессионного анализа для построения базовых линий потребления энергетических ресурсов.

Объекты генерации тепловой энергии. Для анализа использовались данные о суточном потреблении природного газа трёх районных отопительных котельных. Котельные имеют различную установленную мощность, присоединенную нагрузку, протяженность тепловых сетей. Потребители котельных 1 и 2 – преимущественно 3-5 этажные жилые здания. Потребители котельной 3 – преимущественно 5-ти и 9-ти этажные жилые здания. На всех котельных установлены водогрейные котлы разного типа. Степень автоматизации процессов регулирования отпуска тепловой энергии также различны. На котельных 1 и 3 установлены современные горелки с автоматикой управления (микродиффузионные и модуляционные). Регулировка – по установленной температуре теплоносителя. На котельной 2 горелки щелевые подовые, автоматика устаревшая. Погодозависимое регулирование отпускаемой тепловой энергии отсутствует на всех котельных.

Для рассматриваемых котельных доступны следующие данные о потреблении природного газа: котельная 1 – суточное потребление для отопительных сезонов 2016/2017 гг., 2017/2018 гг., 2018/2019 гг.; котельной 2 – суточное потребление для отопительных сезонов 2018/2019 гг., 2019/2020 гг.; котельная 3 – суточное потребление для отопительных сезонов 2016/2017 гг., 2017/2018 гг., 2018/2019 гг. и 2019/2020 гг.

Погодные данные для анализа. При проведении исследования были использованы следующие погодные данные для рассматриваемых отопительных сезонов: среднесуточная температура наружного воздуха, минимальная и максимальная температура наружного воздуха, суточная суммарная (прямая и рассеянная) солнечная радиация, среднесуточная скорость ветра. В дальнейшем для анализа будет использован перепад суточной температуры – разность между максимальной и минимальной температурами воздуха. Не только величина среднесуточной температуры, но и степень её изменения в течении суток может оказать влияние на параметры эффективности котельной, т.к. способность котельной реагировать на изменение температуры зависит от инерционности основного и вспомогательного оборудования, степени автоматизации процессов регулирования.

Построение моделей потребления природного газа в зависимости от фактических погодных условий. Для определения зависимости потребления природного газа котельными от погодных и климатических условий (без учета характеристик оборудования и параметров работы системы теплоснабжения) были использованы методы регрессионного анализа. Цель – получить модель множественной регрессии вида [7-10]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4,$$

где Y – зависимая переменная, в нашем случае, суточное потребление природного газа, м^3 ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – параметры регрессии; X_1, X_2, X_3, X_4 – независимые переменные (факторы), определяющие поведение зависимой переменной.

В качестве независимых переменных были приняты следующие параметры: X_1 – среднесуточная температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; X_2 – суточный перепад температур (разность между максимальной и минимальной температурой воздуха в течении суток), $^{\circ}\text{C}$; X_3 – показатель суточной суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$; X_4 – среднесуточная скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$.

Выбор указанных параметров в качестве независимых переменных обусловлен рядом соображений. Выбор среднесуточной температуры очевиден – это определяющая величина температурного графика работы котельной. Величина суточного перепада температур может оказывать влияние на эффективность работы оборудования котельной и системы теплоснабжения ввиду инерционности, различного уровня автоматизации процессов регулирования работы оборудования, отсутствия погодозависимого регулирования. В комплексе, значительные суточные перепады температуры могут привести к отклонению расхода топлива относительно линии потребления температурного графика. Солнечная радиация – одна из составляющих расчета теплопоступлений в зданиях и сооружениях, в связи с этим, может косвенно оказывать влияние на потребление топлива объектами генерации тепловой энергии. Скорость ветра влияет на интенсивность процессов инфильтрации в зданиях и сооружениях, а также на интенсивность теплообмена для контактирующих с наружным воздухом поверхностей.

Для оценки качества модели были использованы следующие статистические критерии [7-10]: коэффициент детерминации R^2 , скорректированный коэффициент детерминации R_{adj}^2 , критерий Фишера F , стандартная ошибка коэффициентов ($std.err.$), критерий Стьюдента (t), p -value тест (минимальный уровень значимости).

Полученные уравнения регрессии для рассматриваемых котельных имеют вид:

- котельная 1:

$$Y = 4733.4044 - 237.8018 \cdot X_1 - 26.0506 \cdot X_2 - 1.039 \cdot X_3 + 35.9105 \cdot X_4,$$

- котельная 2:

$$Y = 4344.3919 - 176.8798 \cdot X_1 - 9.8752 \cdot X_2 - 3.403 \cdot X_3 + 36.0442 \cdot X_4,$$

- котельная 3:

$$Y = 6501.2365 - 319.2427 \cdot X_1 - 17.7229 \cdot X_2 - 2.9546 \cdot X_3 + 46.4749 \cdot X_4.$$

Статистические критерии оценки качества полученных моделей представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Критерии оценки качества моделей

Критерий	Котельная 1	Котельная 2	Котельная 3
Коэффициент детерминации R^2	0.904	0.851	0.93
Скорректированный коэффициент детерминации R_{adj}^2	0.903	0.849	0.93
Критерий Фишера F	1235	517.2	2382

Таблица 2. Статистическая оценка коэффициентов регрессии

	Котельная 1			Котельная 2			Котельная 3		
	<i>std. err.</i>	<i>t</i>	<i>p-value</i>	<i>std. err.</i>	<i>t</i>	<i>p-value</i>	<i>std. err.</i>	<i>t</i>	<i>p-value</i>
β_0	81.594	58.011	0.000	104.87	41.427	0.000	80.316	80.945	0.000
β_1	3.774	-63.013	0.000	5.171	-34.208	0.000	3.762	-84.863	0.000
β_2	9.235	-2.821	0.005	11.455	-0.862	0.389	9.131	-1.941	0.053
β_3	0.547	-1.9	0.058	0.605	-5.622	0.000	0.513	-5.757	0.000
β_4	8.486	4.232	0.000	10.563	3.412	0.001	8.234	5.644	0.000

На рисунках 1-3 отображены фактические и определенные с помощью разработанных регрессионных моделей данные о потреблении природного газа.

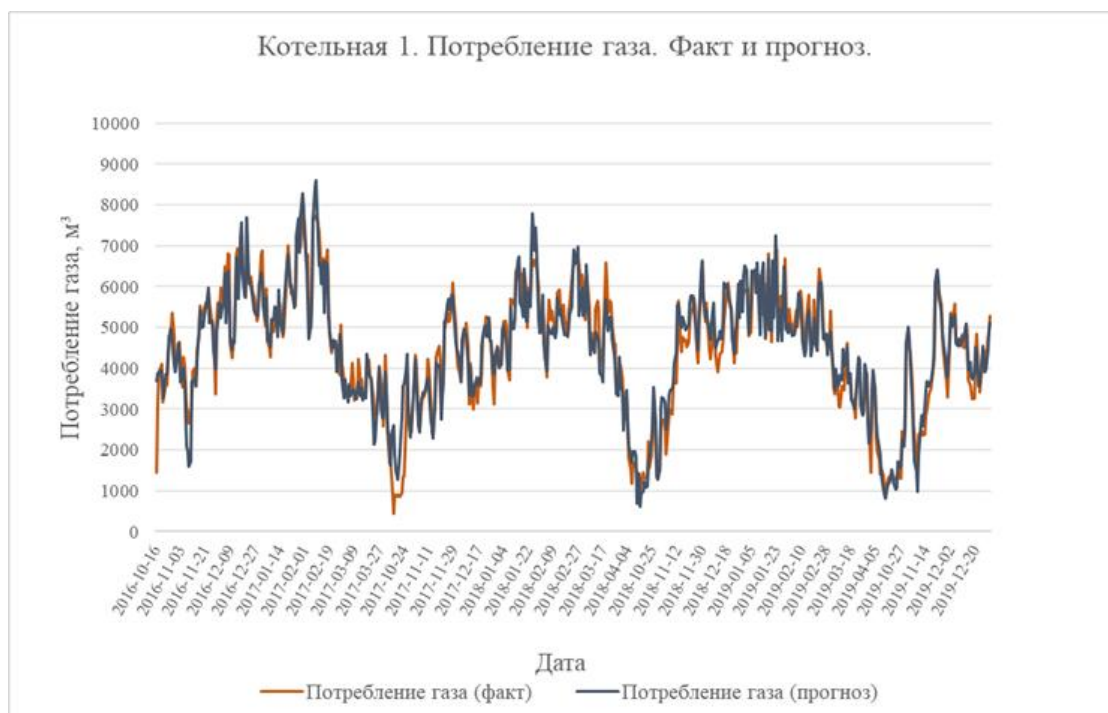


Рис. 1. Фактическое и прогнозируемое потребления газа котельной 1

На рис. 4-6 отображено отклонение фактического потребления природного газа от определенного с помощью моделей в зависимости от температуры наружного воздуха и среднесуточного перепада температур.

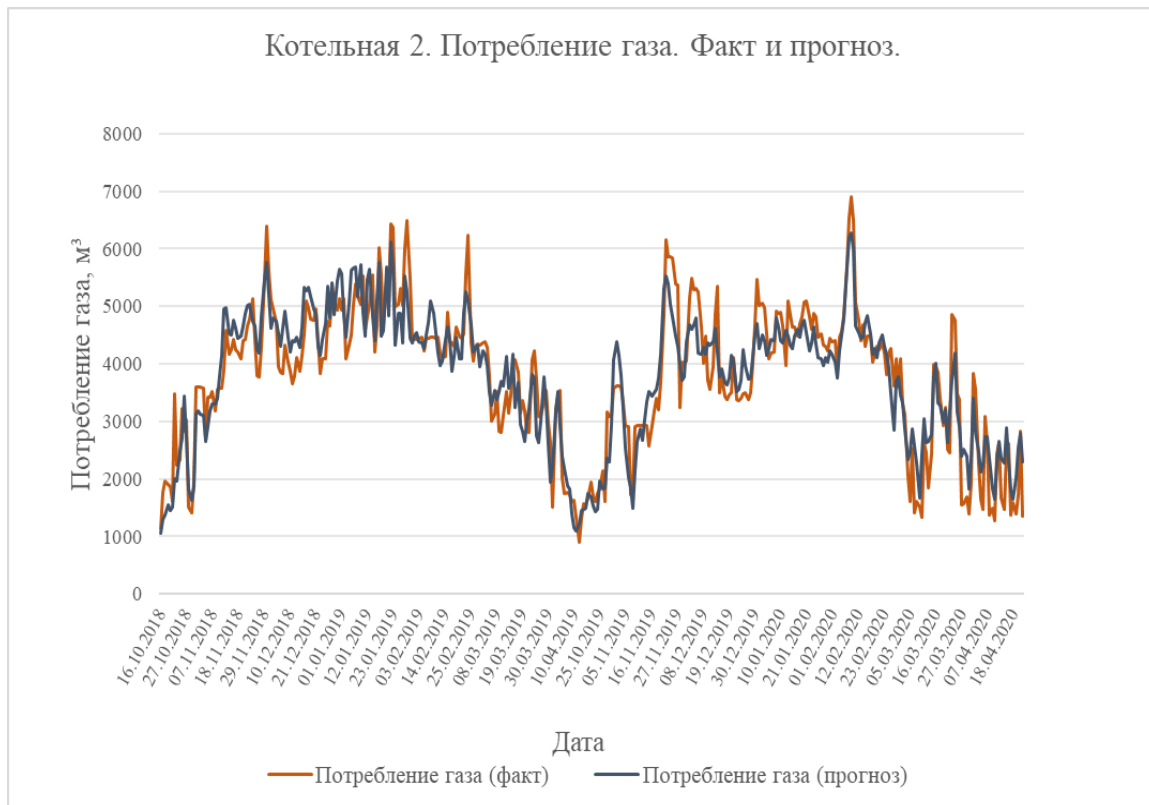


Рис. 2. Фактическое и прогнозируемое потребления газа котельной 2



Рис. 3. Фактическое и прогнозируемое потребления газа котельной 3

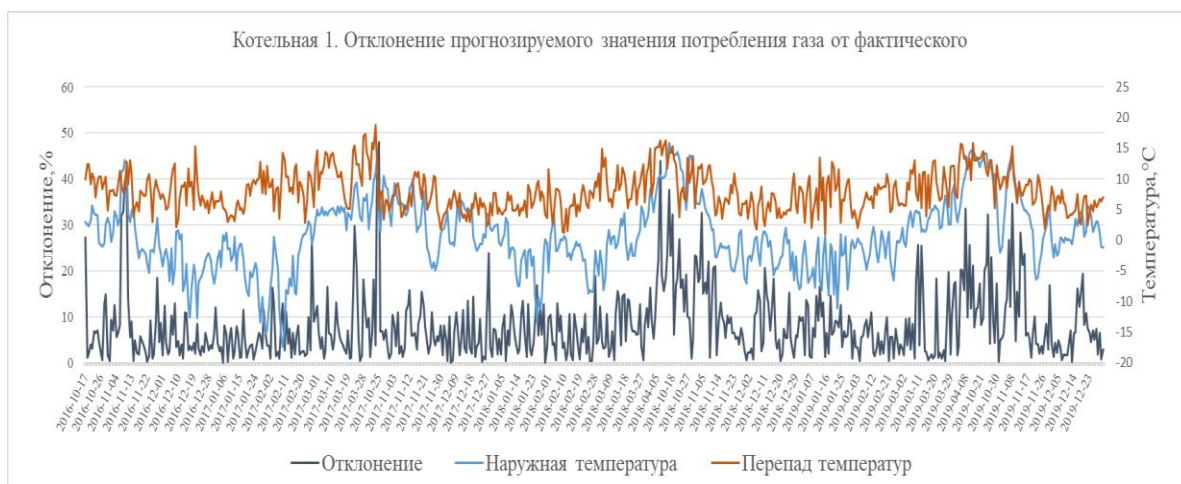


Рис. 4. Отклонение прогнозируемого потребления от фактического котельной 1

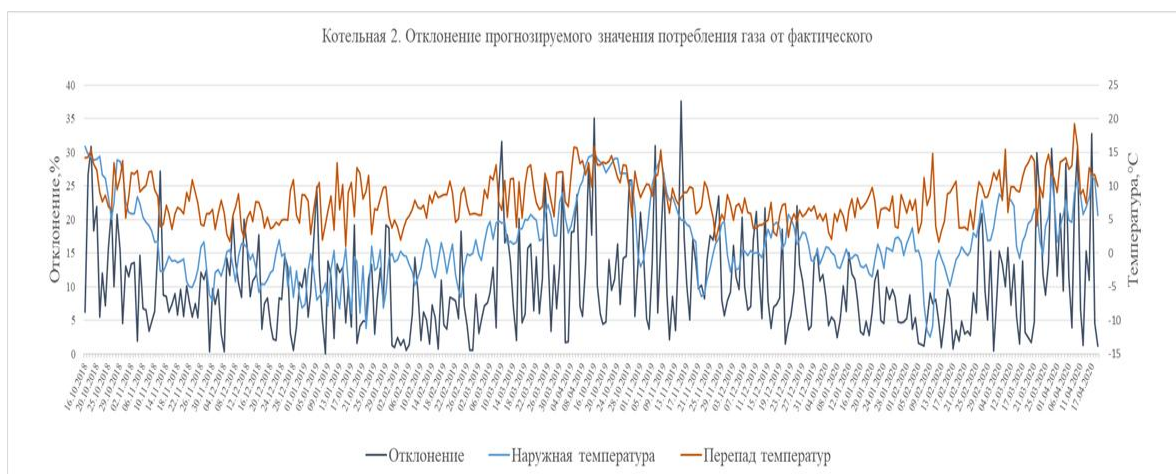


Рис. 5. Отклонение прогнозируемого потребления от фактического котельной 2

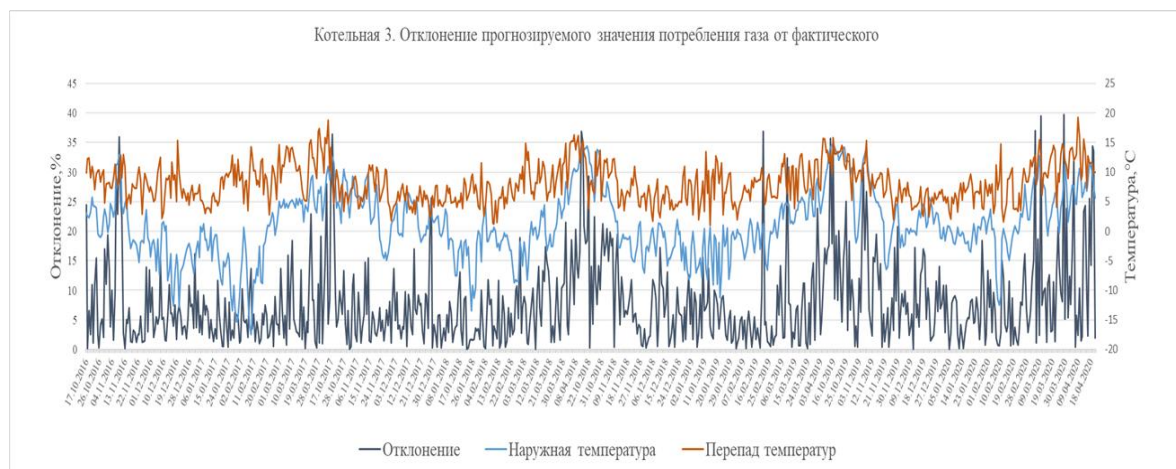


Рис. 6. Отклонение прогнозируемого потребления от фактического котельной 3

Выводы. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- модель на основе множественной линейной регрессии позволяет достаточно эффективно прогнозировать изменение потребления природного газа котельными в зависимости от погодных условий;

- качество и достоверность разработанных моделей повышается с увеличением числа наблюдений n ;

- все выбранные для построения модели независимые факторы имеют существенную значимость. На степень значимости факторов оказывает влияние характеристики потребителей тепловой энергии (размеры и этажность зданий, режимы эксплуатации) и эффективность работы основного и вспомогательного оборудования котельной (КПД, уровень автоматизации, эффективность процессов регулирования, характеристики тепловых сетей);

- отклонение прогнозируемых данных от фактических увеличивается в периоды с высокими среднесуточными температурами и суточными перепадами температур (рис. 4-6), что особенно ярко выражено в начале и конце отопительного периода, а также в периоды аномальных оттепелей и резких изменениях погодных условий. Такие периоды характеризуются нестабильностью работы котельных и систем теплоснабжения в целом.

В целом, методы прогнозирования потребления энергоресурсов на основе анализа фактических показателей работы котельных и фактических погодных условий позволяют получить более четкую картину эффективности работы объектов генерации и систем распределения тепловой энергии. Расчеты на основе существующих методик и нормативных стандартов не позволяют учесть ряд факторов: текущую эффективность различных элементов цепи производство-транспорт-потребление тепловой энергии, фактические погодные условия, которые могут существенно отличаться от нормативных и т.д. Это может существенно повлиять на достоверность определения фактической эффективности работы котельных и определения эффективности мероприятий по модернизации объектов теплоснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гужов, С. В. Составление прогнозного топливно–энергетического баланса котельной в условиях недостаточности данных / С. В. Гужов, Е. Г. Гапо, В. А. Шепель // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 33–39.
2. Гапо, Е. Г. О прогнозировании трендов изменения удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайонов и городов в условиях недостаточности данных / Е. Г. Гапо, С. В. Гужов, А. А. Кролин // Энергетические системы: III Междунар. науч.–техн. конф.: сб. трудов. – 2018. – С. 87–94
3. Максимюк, Е. В. Прогнозирования зависимых контролируемых параметров работы источников теплоснабжения / Е. В. Максимюк // Современные проблемы науки и образования. —2014. — № 6 (приложение «Технические науки»). – С. 22.
4. Максимюк, Е. В. Применение регрессионного анализа для выявления степени влияния отдельных узлов оборудования на эффективность работы котельных / Е. В. Максимюк, В. С. Микшина // Вестник кибернетики. – 2014. – №4(16) – С.12–21.
5. Максимюк, Е. В. Математическое моделирование для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности / Е. В. Максимюк, В. С. Микшина // Качество. Инновации. Образование. – 2014. – № 8. – С. 54–63.
6. Baseline Energy Use Modeling and Characterization in Tertiary Buildings Using an Interpretable Bayesian Linear Regression Methodology / B. Grillone, G. Mor, S. Danov [et al.] // Energies. – 2021. – V. 14. – №17. – P. 556. – DOI 10.3390/en14175556.
7. Вуколов, Э. А. Регрессионный анализ. Методические указания по курсу «Статистика» / Э. А. Вуколов. – М.: МИЭТ, 2000. – 52 с.

8. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х ч./ Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986 г. – 367 с.
9. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980 г. – 456 с.
10. Рао, С. Р. Линейные статистические методы и их применения / С. Р. Рао. – Наука, 1968 г. – 548 с.

REFERENCES LIST

1. Guzhov, S. V. Sostavlenie prognoznogo toplivno–energeticheskogo balansa kotelnoi v usloviakh nedostatochnosti dannykh / S. V. Guzhov, E. G. Gasho, V. A. Shepel // Energeticheskie sistemy. – 2019. – № 1. – S. 33–39.
2. Gasho, E. G. O prognozirovanii trendov izmeneniia udelnykh smeshannykh nagruzok elektropotrebiteli mikroraionov i gorodov v usloviakh nedostatochnosti dannykh / E. G. Gasho, S. V. Guzhov, A. A. Krolin // Energeticheskie sistemy: III Mezhdunar. nauch.–tekhn. konf.: sb. trudov. – 2018. – S. 87–94
3. Maksimiuk, E. V. Prognozirovaniia zavisimykh kontroliruemykh parametrov raboty istochnikov teplosnabzheniia / E. V. Maksimiuk // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia. —2014. — № 6 (prilozhenie «Tekhnicheskie nauki»). – S. 22.
4. Maksimiuk, E. V. Primenenie regressionnogo analiza dlia vyivleniia stepeni vliianiia otdelnykh uzlov oborudovaniia na effektivnost raboty kotelnykh / E. V. Maksimiuk, B. C. Mikshina // Vestnik kibernetiki. – 2014. – №4(16) – S.12–21.
5. Maksimiuk, E. V. Matematicheskoe modelirovanie dlia podderzhki priniatiia reshenii v oblasti obespecheniia energeticheskoi effektivnosti / E. V. Maksimiuk, B. C. Mikshina // Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie. – 2014. – № 8. – S. 54–63.
6. Baseline Energy Use Modeling and Characterization in Tertiary Buildings Using an Interpretable Bayesian Linear Regression Methodology / B. Grillone, G. Mor, S. Danov [et al.] // Energies. – 2021. – V. 14. – №17. – P. 556. – DOI 10.3390/en14175556.
7. Vukolov, E. A. Regressionnyi analiz. Metodicheskie ukazaniia po kursu «Statistika» / E. A. Vukolov. – М.: MIET, 2000. – 52 s.
8. Dreiper, N. Prikladnoi regressionnyi analiz: V 2–kh ch./ N. Dreiper, G. Smit. – М.: Finansy i statistika, 1986 g. – 367 s.
9. Seber, Dzh. Lineinyi regressionnyi analiz / Dzh. Seber. – М.: Mir, 1980 g. – 456 s.
10. Rao, S. R. Lineinye statisticheskie metody i ikh primeneniia / S. R. Rao. – Nauka, 1968 g. – 548 s.

Поступила в редакцию 01.12.2025 г., рекомендована к изданию 09.02.2026 г.

APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS FOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF HEAT GENERATION UNITS

Biriukov A.B., Polkhov S.V.

This paper examines the application of regression analysis methods to assess the efficiency of thermal energy generation facilities. Based on actual natural gas consumption data and observed weather conditions, regression models describing the dependence of fuel consumption on meteorological parameters were developed for three heating boiler plants. The constructed consumption models were used to evaluate the overall operational efficiency of the boiler plants. The applicability of the developed models for forecasting fuel consumption is also discussed.

Keywords: boiler plant, gas consumption, temperature, linear regression, depended and independent variable, regression equation.

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.donntu@mail.ru

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.
ORCID: 0000-0002-8146-2017

Полхов Сергей Валерьевич

генеральный директор ГУП ДНР «Донбасстеплоэнерго»,
соискатель ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
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.

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ТОКА СТАТОРА
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПИТАЮЩЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

© 2026 Шелехова О.Г.

Разработан метод определения минимального уровня тока статора асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод определения минимума уровня тока статора, изменение питающего напряжения.

Введение. Ежегодно на долю асинхронных двигателей (АД) приходится 20–25% общего числа повреждений электрооборудования [1]. В подавляющем большинстве случаев 85–95% отказы двигателей происходят из-за повреждения обмоток [2]. Статистика показывает, что до 80% отказов напрямую или косвенно связаны с авариями сетевого напряжения [2], из них до 60% – вследствие отклонения питающего напряжения [2].

Согласно ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная» отклонение от напряжения прямой последовательности не должно превышать 5 % длительно и 10% кратковременно $U_{np} = (198 - 242)$ [3].

Одновременно в настоящее время действует ГОСТ 29322–2014 «Напряжения стандартные» [4], который вступил в действие 01.10.2015 г., который «повысил» напряжение до 230 В. При допустимых согласно ГОСТ 29322–2014 отклонениях напряжения $\pm 10\%$ диапазон допустимых значений питающего напряжения $U_{np} = (207 - 253)$. В результате одновременного действия ГОСТ 32144–2013 и ГОСТ 29322–2014 в настоящее время диапазон допустимых значений напряжения расширяется до $U_{np} = (198 - 253)$ [3, 4].

На практике рост удельной мощности нагрузок сети приводит к тому, что отклонение напряжения может достигать 15 % и более [5–13], что превышает допустимое значение [3, 4].

Изменение напряжения может привести к росту тока в обмотках асинхронного двигателя, к увеличению потерь, росту температуры обмоток АД и в результате – к досрочному выходу его из строя. Влияние отклонения питающего напряжения на эксплуатационные характеристики АД рассмотрено в работах отечественных и зарубежных авторов [5-18].

Напряжения прямой последовательности в разной степени влияет на различные АД [14-16]. Например, снижение напряжения может приводить как к снижению [14-16], так и к увеличению [14-15] тока статора в зависимости от параметров схемы замещения АД и нагрузки на валу электродвигателя. В результате тепловые нагрузки АД с различными параметрами схемы замещения будут различаться. Влияние величины питающего напряжения на уровень тока статора и ротора АД рассмотрено в работах [14-15].

Однако, существующие математические модели [14-15] для оценки влияния питающего напряжения на электромеханические характеристики содержат итерационный цикл (для определения скольжения, соответствующего заданному напряжению) [14–15] и предполагают использование компьютерной техники, что затрудняет их использование при решении задач связанных с рациональным выбором АД в условиях нестабильного питающего напряжения и данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Целью данной работы была разработать метод определения минимального уровня тока статора асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения.

В [16] получена аналитическая зависимость скольжения асинхронного двигателя от напряжения прямой последовательности:

$$s_U \approx \frac{s_n}{U_{np}^{*2}}, \quad (1)$$

где $U_{np}^* = \frac{U_{np}}{U_n}$ – относительное значение напряжения прямой последовательности;

s_n, s_U – скольжение АД в номинальном режиме и при отклонении напряжения прямой последовательности соответственно.

Выражение (1) позволило автору получить в предшествующих исследованиях [16] безитерационные зависимости токов АД от напряжения прямой последовательности U_{np} с использованием Т-образной или Г-образной (рис. 1) схем замещения.

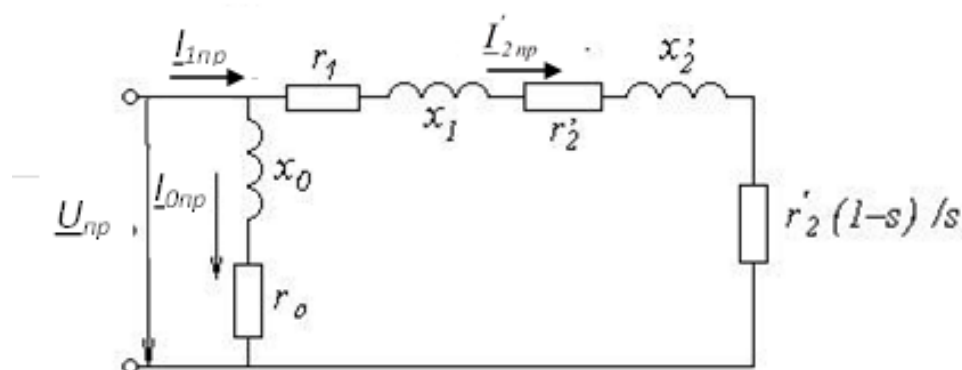


Рис. 1. Г-образная схема замещения АД

Например, для Г-образной (рис. 1) схемы замещения и соответствующей векторной диаграммы (рис. 2) [16]:

$$I_{0np}^* = \frac{U_{np}^*}{\sqrt{R_0^* + X_0^*}}; \quad (2)$$

$$I_{2np}^* = \frac{U_{np}^*}{\sqrt{\left(X_1^* + X_2^* \right)^2 + \left(R_1^* + \frac{R_2^* U_{np}^{*2}}{s_n} \right)^2}}, \quad (3)$$

$$I_{1np}^* = \sqrt{I_{0np}^{*2} + I_{2np}^{*2} - 2 \cdot I_{0np}^* \cdot I_{2np}^* \cos(180^\circ - (\varphi_0 - \varphi_2))}, \quad (4)$$

где: $I_{0np}^*, I_{2np}^*, I_{1np}^*$ – относительные значения токов; $X_0^*, R_0^*, X_1^*, X_2^*, R_1^*, R_2^*$ – относительные значения параметров схемы замещения АД (рис. 1). В качестве базового значения сопротивления в (2–4) принято $Z_0 = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}}$; φ_0, φ_2 – углы сдвига фаз между вектором напряжения U_{np}^* и векторами токов I_{0np}^* и I_{2np}^* соответственно.

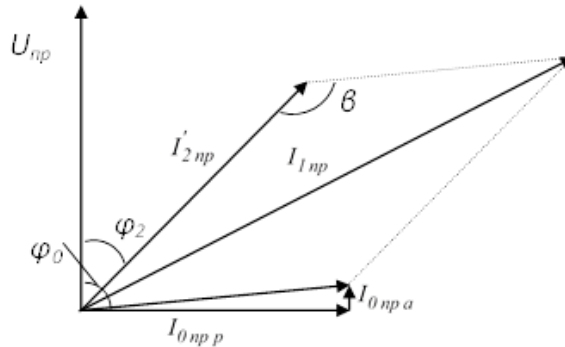


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений АД

Используя формулу приведения $\cos(180^\circ - (\varphi_0 - \varphi_2)) = -\cos(\varphi_0 - \varphi_2)$, выражение (4) примет вид:

$$I_{1np}^* = \sqrt{I_{0np}^{*2} + I_{2np}^{*2} + 2 \cdot I_{0np}^* \cdot I_{2np}^* \cos(\varphi_0 - \varphi_2)}. \quad (5)$$

Возведем левую и правую часть выражения (6) в квадрат:

$$I_{1np}^{*2} = I_{0np}^{*2} + I_{2np}^{*2} + 2 \cdot I_{0np}^* \cdot I_{2np}^* \cos(\varphi_0 - \varphi_2). \quad (6)$$

Формула косинуса разности $\cos(\varphi_0 - \varphi_2)$, с учетом соотношений активных, реактивных и полных сопротивлений, выраженная через треугольник сопротивлений АД:

$$\cos(\varphi_0 - \varphi_2) = \cos \varphi_0 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_0 \sin \varphi_2 = \frac{r_0^*}{Z_0^*} \frac{r_1^* + \frac{r_2^* U_{np}^{*2}}{s_H}}{Z^*} + \frac{X_0^*}{Z_0^*} \frac{(X_1^* + X_2^*)}{Z^*}, \quad (7)$$

где $Z_0 = \sqrt{R_0^{*2} + X_0^{*2}}$, $Z = \sqrt{(X_1^* + X_2^*)^2 + \left(R_1^* + \frac{R_2^* U_{np}^{*2}}{s_H} \right)^2}$.

Тогда выражение (7) примет вид:

$$I_{1np}^{*2} = \frac{U_{np}^{*2}}{Z_0^{*2}} + \frac{U_{np}^{*2}}{Z^{*2}} + 2 \cdot \frac{U_{np}^{*2}}{Z_0^* Z^*} \cdot \left[\frac{r_0^*}{Z_0^*} \frac{r_1^* + \frac{r_2^* U_{np}^{*2}}{s_H}}{Z^*} + \frac{X_0^*}{Z_0^*} \frac{(X_1^* + X_2^*)}{Z^*} \right]. \quad (8)$$

Для нахождения точки минимума тока статора в функции напряжения прямой последовательности, продифференцируем выражение (8) по напряжению прямой последовательности: $I_{1np}^*(U_{np}^*) = f'(U_{np}^*)$:

$$U_{np\min}^* = \sqrt{\frac{S_H}{R_2^*} \left(\sqrt{X_0^{*2} + R_0^{*2} + 2X_0^*(X_1^* + X_2^*)} - 2R_1^*R_0^* - 2R_1^* \right)}. \quad (9)$$

Их выражения (9) следует, что на величину точки минимума функции $I_{1np}^* = f(U_{np}^*)$ ($U_{np}^* = U_{np\min}^*$) влияют все параметры схемы замещения и скольжение АД.

Для АД параметры $(X_1^* + X_2^{*'})^2 \ll X_0^{*2}$; $X_1^{*2} \ll X_0^{*2}$; $X_2^{*2} \ll X_0^{*2}$; $R_1^{*2} \ll X_0^{*2}$ [19–22]. Если пренебречь параметрами схемы замещения АД $(X_1^* + X_2^{*'})^2 \approx 0$; $X_1^{*2} \approx 0$; $X_2^{*2} \approx 0$; $R_1^{*2} \approx 0$, то выражение (9) примет вид, что совпадает с полученными ранее автором [16] результатом:

$$U_{np\min}^* = \sqrt{\frac{S_H}{R_2^*} X_0^*}. \quad (10)$$

Полученное аналитическое выражение (9) позволяет снизить погрешность нахождения $U_{np\min}^*$ по сравнению с формулой (10), которая связана с ненулевыми значениями параметров X_1^* , $X_2^{*'}$, R_1^* реальных АД.

В качестве примера для нескольких АД соответствии с формулой (9) определены значения $U_{np\min}^*$ (табл. 1).

Таблица 1. Значения $U_{np\min}^*$ для АД различной мощности

	4AA56B2Y3	4AA63B2Y3	4A71B2Y3	4A80B2Y3	4A100L2Y3	4A132M4Y3	4A180S2Y3	4A200L2Y3	4A250M2Y3	4A315S2Y3
P_1 , кВт	0,25	0,55	1,1	2,2	5,5	11	22	45	90	160
$U_{np\min}^*$	0,55	0,60	0,76	0,90	1,20	1,47	1,67	1,95	2,01	2,79

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 следует, что точки минимума функции $I_{1np}^* = f(U_{np}^*)$ могут наблюдаться при изменении напряжения прямой последовательности в широких пределах. Например (табл. 1), для АД 4AA56B2Y3 минимум тока статора наблюдается при $U_{np\min}^* = 0.55U_{np}^*$, для АД 4A71B2Y3 – при $U_{np\min}^* = 0.76U_{np}^*$, для 4A80B2Y3 – при $U_{np\min}^* = 0.90U_{np}^*$, для 4A100L2Y3 – при $U_{np\min}^* = 1.2U_{np}^*$ и т. д.

Подкоренное выражение (9) для нахождения $U_{np\min}^*$ обозначим, как коэффициент сопротивления:

$$K_{R\min}^* = \frac{S_H}{R_2^*} \left(\sqrt{X_0^{*2} + R_0^{*2} + 2X_0^*(X_1^* + X_2^*)} - 2R_1^*R_0^* - 2R_1^* \right). \quad (11)$$

В предшествующих исследованиях [16] получено упрощенное выражение для нахождения коэффициента сопротивления (без учета параметров X_1^* , X_2^* , R_1^*) и обосновано, что коэффициент K_{Rmin}^* может быть использован в качестве критерия для оценки токовых и тепловых нагрузок в обмотках АД при отклонении питающего напряжения [16].

Полученное в статье выражение (11) позволяет уточнить, полученное ранее упрощенное аналитическое выражение для определения коэффициента K_{Rmin}^* путем учета ненулевых значений параметров X_1^* , X_2^* , R_1^* .

В качестве примера на рис. 3 представлены зависимости тока статора от напряжения прямой последовательности асинхронных двигателей с различными значениями критерия K_{Rmin}^* .

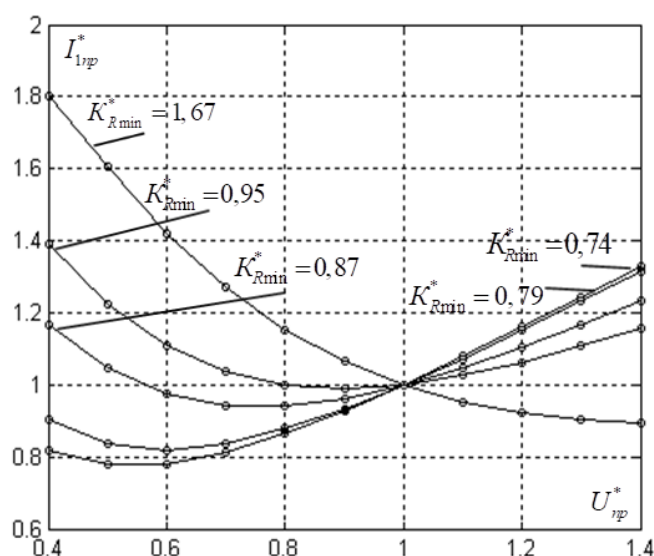


Рис. 3. Зависимости тока статора от напряжения прямой последовательности (U_{np}^*) при различных значениях коэффициента K_{Rmin}^*

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 3 следует, что снижение напряжения прямой последовательности сопровождается снижением тока статора для АД с $K_{Rmin}^* < 1$. В АД с $K_{Rmin}^* < 1$ при снижении питающего напряжения до величины $U_{np}^* = U_{npmin}^*$ (рис. 3) ток статора также снижается до некоторой величины I_{1npmin}^* .

Меньшим значениям K_{Rmin}^* соответствуют более интенсивные темпы снижения тока первичной обмотки. Затем (рис. 3), при дальнейшем снижении напряжения ниже величины U_{npmin}^* ток статора опять растет. Для АД с $K_{Rmin}^* > 1$ снижение питающего напряжения сопровождается монотонным увеличением тока статора, а минимум тока I_{1npmin}^* наблюдается при повышении напряжения питания выше номинального значения.

В работе получено аналитическое выражение для нахождения величины I_{1npmin}^* в функции K_{Rmin}^* :

$$I_{\text{прmin}}^* = \sqrt{\frac{K_{R\text{min}}^*}{Z_0^{*2}} + \frac{K_{R\text{min}}^*}{Z^{*2}} + 2 \cdot \frac{K_{R\text{min}}^*}{Z_0^{*2} Z^{*2}} \cdot \left[r_0^* \left(r_1^* + \frac{r_2^* K_{R\text{min}}^*}{s_H} \right) + X_0^* (X_1^* + X_2^*) \right]}. \quad (12)$$

Из анализа результатов, представленных на рис. 3 и выражения (12) следует, что при $K_{R\text{min}}^* < 1$ более низким значениям $K_{R\text{min}}^*$ соответствуют меньшие значения $I_{\text{прmin}}^*$.

Снижение питающего напряжения ниже номинального значения сопровождается более низкими значениями токов статора для АД с более низкими значениями коэффициента $K_{R\text{min}}^*$. Повышение напряжения прямой последовательности сопровождается более низкими токовыми перегрузками в обмотках статора для АД с более высокими $K_{R\text{min}}^*$.

Выводы. В данной работе благодаря исследованию функции $I_{\text{пр}}^* = f(U_{\text{пр}}^*)$ на экстремум разработан алгоритм расчета значения напряжения, при котором ток статора $U_{\text{пр}}^* = U_{\text{прmin}}^*$ принимает минимальное значение по известным параметрам схемы замещения электродвигателя и его скольжению. Предложенная модель позволяет учесть не только параметры цепи статора и намагничивающего контура электродвигателя, но и его скольжение и параметры цепи ротора двигателя.

Уточнен, разработанный ранее метод определения минимального уровня тока статора асинхронного двигателя при изменении напряжения питающего напряжения. Предложенный метод позволяет определить точку минимума тока статора с учетом всех параметров схемы замещения и скольжения АД. В результате чего уточнено аналитическое выражение для определения коэффициента сопротивления ($K_{R\text{min}}^*$), который может быть использован в качестве критерия для оценки токовых и тепловых нагрузок в обмотках АД при отклонении питающего напряжения. Установлено влияние

Полученные результаты могут быть использованы при создании алгоритмов работы защитных устройств АД от тепловых перегрузок, а также при выборе АД в условиях отклонения питающего напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беспалов, А. В. Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором: учебное пособие для курсового проектирования / А. В. Беспалов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2012. – 154 с.
2. Дайнеко, В. А. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения / В. А. Дайнеко, Ж. Г. Юрковец // Энергетика и транспорт: Агропанорама. – 2021. – С. 22–25.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгосударственный стандарт: введен 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014 – 15 с.
4. ГОСТ 29322-2014. Напряжения стандартные: межгосударственный стандарт: введен 2015-10-01. – М.: Стандартинформ, 2015 – 9 с.
5. Влияние отклонения напряжения на потери мощности в электрооборудовании электрических сетей и потребителей / Д. Г. Сафонов, А. Г. Лютаревич, С. Ю. Долингер, С. В. Бирюков // Электротехника и энергетика: Омский научный вестник – № 2 (120) – 2013. – С. 203–206.
6. Кучумов, Л. А. Зависимость нагрузки и потерь напряжения от напряжения, Новости электротехники / Л. А. Кучумов, А. А. Кузнецов // Энергосберегающее регулирование напряжения в узлах нагрузки. – 2018. – №2. – С.48–53.
7. Ананичева, С. С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин.; 3-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с.

8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. Соркин, М. А. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Способы защиты от аварийных режимов работы / М. А. Сорокин // Новости электротехники. – 2005. – № 4(34).
10. Вагин, Г. Я. О необходимости приведения норм ГОСТ 13109-97 к требованиям международных стандартов / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов // Промышленная энергетика. – 2004. – №9. – С. 45–49.
11. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 221 с.
12. Сергеев, С. С. Показатели качества электроэнергии / С. С. Сергеев // Гл. энергетик. – 2004. – №1. – С. 37–47.
13. Sayenko, Y. L. Influence of power quality on electricity supply reliability / Y. L. Sayenko, A. V. Gorpinich // Proceedings V School-Conference “Electrotechnics Non-Sinusoidal Currents (EPN’2000)”. – Zielona Gora, Poland, 2000. – P. 251–259.
14. Федоров, М. М. Особенности тепловых процессов в асинхронных двигателях при аномальных режимах работы / М. М. Федоров, В. Ф. Денник, Е. Р. Алексеев // Электротехнические и электромеханические системы. – 2000. – №403. – С. 170–174.
15. Федоров, М. М. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений / М. М. Федоров, В. Ф. Денник, А. В. Корощенко // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика. – 1999. – Вып. 4. – С. 138–141.
16. Шелехова, О. Г. Определение зависимости тока статора асинхронного двигателя от напряжения прямой последовательности при различных параметрах его схемы замещения / О. Г. Шелехова // Сборник трудов СПб ГУАП. – 2016. – С. 284–291.
17. Пинчук, О. Г. Моделирование токов и температур асинхронных двигателей при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы / О. Г. Пинчук // Материалы II МНТК «Моделирование и компьютерная графика». – Донецк, 2007. – С. 347–353.
18. Федоров, М. М. Защита асинхронных двигателей проходческих лебедок от тепловых перегрузок / М. М. Федоров // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. горно-электромеханическая. – 1999. – Вып. 7. – С. 228–232.
19. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия. – 1980. – 928 с.
20. Проектирование электрических машин. -3-е изд. испр. и доп. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.
21. Справочник по электрическим машинам: в 2т. / под общей редакцией И. П. Копылова и Б. К. Клокова Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
22. Копылов, И. П. Электрические машины: учебник для вузов / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

REFERENCES LIST

1. Bespalov, A. V. Proektirovanie asinkhronnogo dvigatelja obshchego naznacheniia s korotkozamknutym rotorom: uchebnoe posobie dlia kursovogo proektirovaniia / A. V. Bespalov. – Nizhnevartovsk: Izd-vo Nizhnevart. gumanit. un-ta, 2012. – 154 s.
2. Daineko, V. A. Metody diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei v rabochikh rezhimakh i perspektivy ikh primeneniia / V. A. Daineko, Zh. G. Iurkovets // Energetika i transport: Agropanorama. – 2021. – S. 22–25.
3. GOST 32144-2013. Elektricheskaiia energiia. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniia: mezhgosudarstvennyi standart: vveden 2014-07-01. – М.: Standartinform, 2014 – 15 s.
4. GOST 29322-2014. Napriazheniia standartnye: mezhgosudarstvennyi standart: vveden 2015-10-01. – М.: Standartinform, 2015 – 9 s.
5. Vliianie otkloneniia napriazheniia na poteri moshchnosti v elektrooborudovanii elektricheskikh setei i potrebitelei / D. G. Safonov, A. G. Liutarevich, S. Iu. Dolinger, S. V. Biriukov // Elektrotehnika i energetika: Omskii nauchnyi vestnik – № 2 (120) – 2013. – S. 203–206.
6. Kuchumov, L. A. Zavisimost nagruzki i poter napriazheniia ot napriazheniia, Novosti elektrotehniki / L. A. Kuchumov, A. A. Kuznetsov // Energoberegaiushchee regulirovanie napriazheniia v uzlakh nagruzki. – 2018. – №2. – С.48–53.
7. Ananicheva, S. S. Kachestvo elektroenergii. Regulirovanie napriazheniia i chastoty v energosistemakh: uchebnoe posobie / S. S. Ananicheva, A. A. Alekseev, A. L. Myzin.; 3-e izd., ispr. – Ekaterinburg: UrFU, 2012. – 93 s.

8. Asinkhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik / A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaia. – M.: Energoizdat, 1982. – 504 s.
9. Sorkind, M. A. Asinkhronnye elektrodvigateli 0,4 kV. Sposoby zashchity ot avariinykh rezhimov raboty / M. A. Sorokin // *Novosti elektrotehniki*. – 2005. – № 4(34).
10. Vagin, G. Ia. O neobkhodimosti privedeniia norm GOST 13109-97 k trebovaniiam mezhdunarodnykh standartov / G. Ia. Vagin, A. A. Sevostianov // *Promyshlennaia energetika*. – 2004. – №9. – S. 45–49.
11. Zhezhelenko, I. V. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol na promyshlennykh predpriatiiakh / I. V. Zhezhelenko. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 221 s.
12. Sergeev, S. S. Pokazateli kachestva elektroenergii / S. S. Sergeev // *Gl. energetik*. – 2004. – №1. – S. 37–47.
13. Sayenko, Y. L. Influence of power quality on electricity supply reliability / Y. L. Sayenko, A. V. Gorpnich // *Proceedings V School-Conference “Electrotechnics Non-Sinusoidal Currents (EPN’2000)”*. – Zielona Gora, Poland, 2000. – P. 251–259.
14. Fedorov, M. M. Osobennosti teplovykh protsessov v asinkhronnykh dvigateliakh pri anomalnykh rezhimakh raboty / M. M. Fedorov, V. F. Dennik, E. R. Alekseev // *Elektrotekhnicheskie i elektromekhanicheskie sistemy*. – 2000. – №403. – S. 170–174.
15. Fedorov, M. M. Issledovanie raspredeleniia temperatur uzlov asinkhronnogo dvigatelja pri nesimmetrii pitaiushchikh napriazhenii / M. M. Fedorov, V. F. Dennik, A. V. Koroshchenko // *Sb. tr. DonGTU. Ser. elektrotehnika i energetika*. – 1999. – Vyp. 4. – S. 138–141.
16. Shelekhova, O. G. Opredelenie zavisimosti toka statora asinkhronnogo dvigatelja ot napriazheniia priamoi posledovatelnosti pri razlichnykh parametrah ego skhemy zameshcheniia / O. G. Shelekhova // *Sbornik trudov SPb GUAP*. – 2016. – S. 284–291.
17. Pinchuk, O. G. Modelirovanie tokov i temperatur asinkhronnykh dvigatelei pri razlichnykh kharakteristikakh nesimmetrii seti: metodicheskie podkhody / O. G. Pinchuk // *Materialy II MNTK «Modelirovanie i kompiuternaia grafika»*. – Donetsk, 2007. – S. 347–353.
18. Fedorov, M. M. Zashchita asinkhronnykh dvigatelei prokhodcheskikh lebedok ot teplovykh peregruzok / M. M. Fedorov // *Sb. tr. DonGTU. Ser. gorno-elektromekhanicheskaia*. – 1999. – Vyp. 7. – S. 228–232.
19. Ivanov-Smolenskii, A. V. Elektricheskie mashiny / A. V. Ivanov-Smolenskii. – M.: Energiia. – 1980. – 928 s.
20. Proektirovanie elektricheskikh mashin. -3-e izd. ispr. i dop. / I. P. Kopylov, B. K. Klokov, V. P. Morozkin, B. F. Tokarev. – M.: Vysshaia shkola, 2002. – 757 s.
21. Spravochnik po elektricheskim mashinam: v 2t. / pod obshchei redaktsiei I. P. Kopylova i B. K. Klokova T. 1. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 456 s.
22. Kopylov, I. P. Elektricheskie mashiny: uchebnik dlia vuzov / I. P. Kopylov. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 360 s.

Поступила в редакцию 05.12.2025 г., рекомендована к печати 13.02.2026 г.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE MINIMUM CURRENT LEVEL OF THE STATOR OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WHEN THE SUPPLY VOLTAGE CHANGES

SHelekhova O.G.

A method has been developed for determining the minimum current level of the stator of an asynchronous motor when the supply voltage changes.

Keywords: asynchronous motor, method for determining the minimum current level of the stator, change in supply voltage.

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: jinjaistorik@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.
ORCID: 0009-0005-7930-1184

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 одной статьи от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень, соавторами не могут быть студенты и магистранты.
3. Авторами на адрес электронной почты редакции vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант полного текста статьи (на русском или английском языке) в формате docx. Рекомендуемый объем статьи от 7 до 17 страниц, включая рисунки, таблицы, списки источников, сведения об авторах. 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.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Основной текст статьи:** абзацный отступ 1 см, 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.
 - **Подписные 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:** резервируется для размещения идентификаторов EDN и DOI.
 - **Вторая 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, далее **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, 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 каждый источник в тексте статьи приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.

- **Через строку:** словосочетание **REFERENCES LIST** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см дублируется нумерованный список источников, в котором англоязычные источники приводятся на языке оригинала, а остальные источники приводятся посредством транслитерации кириллических знаков.

- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию хх.хх.20хх г., рекомендована к изданию 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);

- страна, город;

- адрес электронной почты;

- идентификатор ORCID.

7. 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 - 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.

8. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются посредством редактора формул MathType 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.

9. Образец оформления статьи (в т.ч. рисунков, таблиц, формул и источников):

EDN OAXXSW

DOI 10.5281/zenodo.15586055

УДК 681.5:621.37:004.056

КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОКАНАЛОВ ПЭМИН

© 2026 *Третьяков И.А., Данилов В.В.*

В настоящей работе представлены и рассмотрены основные компоненты – функциональные блоки разрабатываемой АСНИ радиоканалов, их функциональные особенности, а также взаимодействие между ними для обеспечения комплексного подхода к исследованию радиоканалов. Предложены функциональные блоки детектирования электромагнитных излучений и наводок.

Ключевые слова: АСНИ, ПЭМИН, радиоканалы, детектирование, обнаружение, подавление.

Введение. Современные научные исследования в области радиоканалов побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) становятся все более актуальными в контексте развития технологий связи и управления [1-3]. С ростом числа беспроводных устройств и расширением спектра их применения возникает необходимость в создании эффективно функционирующих автоматизированных систем, способных обеспечить высокую степень надежности и точности в сборе, анализе и интерпретации данных.

Детектирование электромагнитных излучений и наводок. Анализ технической литературы по различным типам детекторов позволил выбрать соответствующую схему, с перспективой её дальнейшего усовершенствования [3-6].

На рисунке 1 представлена усовершенствованная принципиальная схема модернизированного детектора.

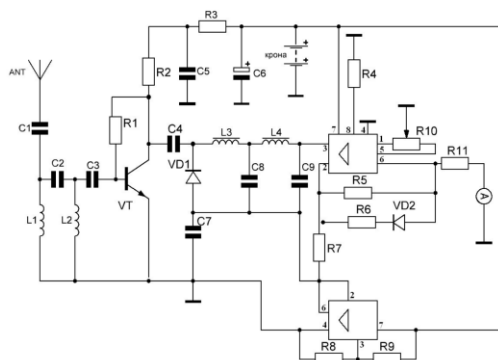


Рис. 1. Функциональный блок детектирования

Оценка ШИМ-сигнала. В таблице 1 приведен набор спектральных составляющих для ШИМ-сигнала на частоте 4,3 кГц. На рисунке 2 показаны диаграммы совпадения, которые являются относительным индикатором качества мероприятий по подавлению.

Таблица 1. Спектральные составляющие ШИМ сигнала

Номер гармоники	Частота, кГц	Амплитуда, dBV
1	4.394	-4.033
2	8.789	-5.854
3	12.69	-7.724
4	17.08	-9.89
5	20.99	-14.38
6	41.99	-17.05

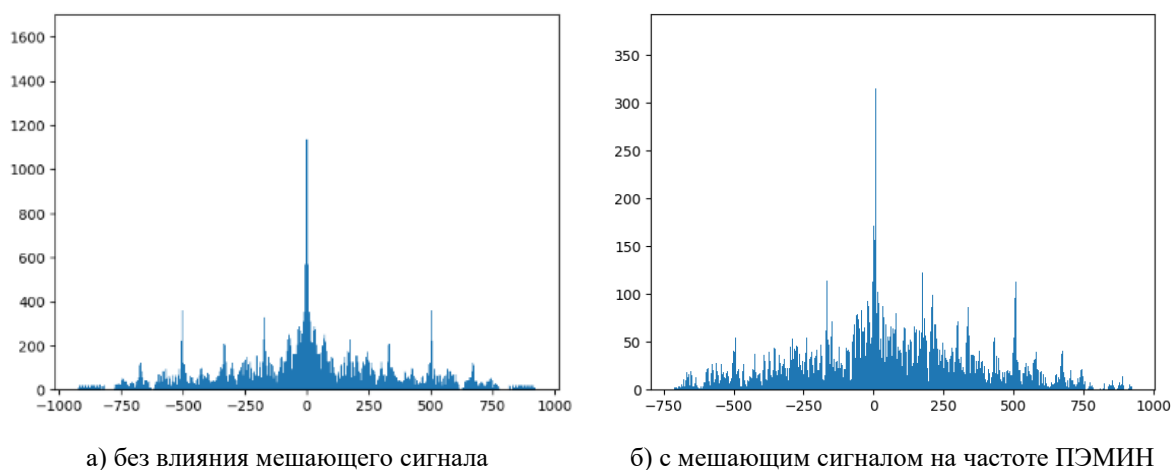


Рис. 2. Диаграммы совпадения

Амплитуда n -ой гармоники описывается выражением:

$$A_n = \frac{A}{n\pi} |\sin(n\pi D)|, \quad (1)$$

где: A – амплитуда ШИМ-сигнала; n – номер гармоники; D – коэффициент заполнения.

Выводы. Таким образом, в работе рассмотрены основные компоненты – функциональные блоки разрабатываемой автоматизированной системы научных исследований радиоканалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 22.12.2025).
2. Методика оценки побочных электромагнитных излучений и наводок / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 126-134. – DOI 10.5281/zenodo.14018656. – EDN DLEMAM.
3. Рушечников, Я. И. Адаптивная автоматизированная система подавления побочных электромагнитных излучений и наводок / Я. И. Рушечников, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 4(39). – С. 150-161. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-150-161. – EDN COPMJH.
4. Wong, K. L. Compact and Broadband Microstrip Antennas / K. L. Wong. – NY: John Wiley&Sons, 2002. – 324 p.
5. Панченко, Б. А. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефедов. – М.: Радио, 1986. – 145 с.
6. Kuhn, M. G. Soft tempest: Hidden data transmission using electromagnetic emanations / M. G. Kuhn, R. J. Anderson // International Workshop on Information Hiding. – Berlin: Springer, 1998. – P. 124-142.

REFERENCES LIST

1. Avtomatizirovannye sistemy nauchnykh issledovaniy [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (data obrashcheniia 22.12.2025).
2. Metodika otsenki pobochnykh elektromagnitnykh izlucheni i navodok / Ia. I. Rushechnikov, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov [i dr.] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 3. – S. 126-134. – DOI 10.5281/zenodo.14018656. – EDN DLEMAM.
3. Rushechnikov, Ia. I. Adaptivnaia avtomatizirovannaia sistema podavleniia pobochnykh elektromagnitnykh izlucheni i navodok / Ia. I. Rushechnikov, I. A. Tretiakov, V. V. Danilov // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 4(39). – S. 150-161. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-150-161. – EDN COPMJH.
4. Wong, K. L. Compact and Broadband Microstrip Antennas / K. L. Wong. – NY: John Wiley&Sons, 2002. – 324 p.
5. Panchenko, B. A. Mikropoloskovye anteny / B. A. Panchenko, E. I. Nefedov. – M.: Radio, 1986. – 145 s.
6. Kuhn, M. G. Soft tempest: Hidden data transmission using electromagnetic emanations / M. G. Kuhn, R. J. Anderson // International Workshop on Information Hiding. – Berlin: Springer, 1998. – P. 124-142.

Поступила в редакцию xx.xx.2026 г., рекомендована к изданию xx.xx.2026 г.

COMPONENTS OF THE AUTOMATED SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCH OF RADIO CHANNELS TEMPEST

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

In this paper, the main components are considered – the functional blocks of the developed ASRS of radio channels, their functional features, as well as the interaction between them. To provide an integrated approach to the study of radio channels, functional blocks for detecting electromagnetic radiation and leads.

Keywords: ASRS, TEMPEST, radio channels, detection, detection, suppression.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой 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, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0002-7816-1563

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 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, Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: 0000-0001-8954-2894

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2026. – № 1.

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://dongu-vestnik04.ru>

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

Подписано к изданию 27.02.2026 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.