

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

1/2025

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

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

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

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

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

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

*Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №2 от 28.02.2025 г.*

Вестник Донецкого национального университета

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

№ 1/2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Безус Ю.А., Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А., Безус А.В.* Экситоноподобные возбуждения в неидеальных гексагональных нанорешетках микропор 5
- Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Браун В.А.* Обзор методов контроля и оценки сточных вод при условии многоточечного сброса загрязняющих веществ 11
- Пометун Е.Д., Лебедев В.Н.* Разработка автоматизированной системы измерения параметров турбулентности 20
- Дайуб А., Силкин А.А., Курушин А.А.* Моделирование навигационной антенны с круговой поляризацией, расположенной на БПЛА 26

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Сасов А.М.* Преобразователь постоянного тока в трехфазный источник тока с многоканальным управлением частотой 37
- Солоха П.М., Нестругина Е.С.* Обнаружение и распознавание растений в природе с использованием сверточных нейронных сетей 43
- Морозов С.А., Морозова Н.И., Лозовик Е.Г.* Применение информационных технологий для визуализации социального графа онлайн сети 55
- Коржавых В.В., Жиликов Е.Г.* Декомпозиция отрезков временных рядов на основе субполосных представлений 65
- Босенко Т.М.* Адаптивный подход к тонкой настройке языковых моделей для задач преобразования текста в SQL 85
- Васильянов А.И., Бондаренко В.И.* Устройства NVIDIA серии Jetson для работы с нейросетями 93
- Маренич М.К., Гуляева И.Б.* Алгоритм автоматического защитного блокирующего отключения рудничного асинхронного двигателя при отсутствии заземления его корпуса 104
- Подлесный В.Ю., Третьяков И.А., Данилов В.В., Колесник Е.В., Худяков И.И.* Процедура восстановления непрерывных сообщений в измерительных процессах в АСУ и АСНИ 112

Пономарёв Д.С. Практическое применение методов градиентного бустинга в решениях задач производственного пенитенциарного сектора 121

Кукарцева Е.С., Петренко Т.С., Сысков А.М., Борисов В.И. Модель классификации когнитивных функций на основе анализа движения глаз человека 129

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Бирюков А.Б., Гридин С.В., Варакута В.В. Самоохлаждающийся сверхпроводящий кабель 141

Сурикова А.Н., Соловьева Е.В., Старостин А.В. Определение режимных и конструктивных параметров многоступенчатых блоках разделения нефтешламов 157

Малеваный М.В., Коновалов Д.А., Черниченко В.В., Солженикин П.А., Крылова Е.В. Перспективные подходы к интенсификации теплообмена в компактных энергонасыщенных системах на основе микроканальных и пористых сред 164

Бирюков А.Б., Гаращенко В.Н. Определение рациональных режимов согласованной работы смежных тепло- и электроэнергетических систем для частного случая самых холодных часов года: микро- и макро- уровни энергопотребления 188

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Александрова А.А., Сердюк А.И. Экологические проблемы при получении водорода для городского автотранспорта 198

Хуррамов М.Г., Назиров З.Ш., Хуррамова Д.М., Джураева Н.Б. Изучение радиохимических показателей безопасности родников на площадях Гисарских хребтов 205

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

Правила для авторов 210

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Series G: Technical sciences

№ 1/2025

CONTENTS

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Bezus IU.A., Rybalka A.E., Rumiantsev V.V., Fedorov S.A., Bezus A.V.* Exciton-like excitations in imperfect hexagonal nanolattices of micropores 5
- Panarin V.M., Maslova A.A., Ryleeva E.M., Braun V.A.* Review of wastewater control and evaluation methods under multiple-point discharge of pollutants 11
- Pometun E.D., Lebedev V.N.* Development of an automated system for measuring turbulence parameters 20
- Dayoub A., Silkin A.A., Kurushin A.A.* Modeling circularly polarized navigation antenna on aerial vehicle 26

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Sasov A.M.* DC converter to three-phase current source with multi-channel frequency control 37
- Solokha P.M., Nestrugina E.S.* Detection and recognition of plants in nature using convolutional neural networks 43
- Morozov S.A., Morozova N.I., Lozovik E.G.* Information technologies for visualization of the social graph 55
- Korzhavykh V.V., Zhiliakov E.G.* Decomposition of time series segments based on subband representations 65
- Bosenko T.M.* Adaptive approach to fine-tuning language models for text to SQL conversion tasks 85
- Vasilianov A.I., Bondarenko V.I.* NVIDIA Jetson series devices for working with neural networks 93
- Marenich M.K., Guliaeva I.B.* Algorithm of automatic protective blocking shutdown of a mine asynchronous motor when its case is not grounded 104
- Podlesnyi V.IU., Tretiakov I.A., Danilov V.V., Kolesnik E.V., Khudiakov I.I.* Procedure for recovering continuous messages in measurement processes in ACS and ASRS 112

<i>Ponomarev D.S.</i> Practical application of gradient boosting methods in solving problems of the production penitentiary sector	121
<i>Kukartseva E.S., Petrenko T.S., Syskov A.M., Borisov V.I.</i> A model for classification of cognitive functions based on human eye movement analysis	129

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Biriukov A.B., Gridin S.V., Varakuta V.V.</i> Self-cooling superconducting cable	141
<i>Surikova A.N., Soloveva E.V., Starostin A.V.</i> Determination of operational and design parameters of multi-stage oil sludge separation units	157
<i>Malevanyi M.V., Konovalov D.A., CHernichenko V.V., Solzhenikin P.A., Krylova E.V.</i> Method for evaluating electromagnetic side effects by algorithmic processing of an array of experimental spectrograms	164
<i>Biriukov A.B., Garashchenko V.N.</i> Determination of rational modes of coordinated operation of adjacent heat and electric power systems for the special case of the coldest hours of the year: micro- and macro-levels of energy consumption	188

TECHNOSPHERE SAFETY

<i>Aleksandrova A.A., Serdiuk A.I.</i> Environmental problems in obtaining hydrogen for urban vehicles	198
<i>KHurramov M.G., Nazirov Z.SH., KHurramova D.M., Dzhuraeva N.B.</i> Studying the hygienic assessment of the content of underground springs in the areas of the Gisar range	205

INFORMATION SECTION

Instructions for authors	210
--------------------------	-----

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬEDN HLMCFF
УДК 530.145

DOI 10.5281/zenodo.15056632

ЭКСИТОНОПОДОБНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕИДЕАЛЬНЫХ
ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ НАНОРЕШЕТКАХ МИКРОПОР

© 2025 Безус Ю.А., Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А., Безус А.В.

Исследованы особенности спектра экситоноподобных возбуждений как для идеальных систем, так и для систем с точечными дефектами (вакансиями во второй подрешетке). Определено, что законы дисперсии для рассматриваемой системы имеют более сложный характер, большее число критических точек, большее число топологических особенностей и их типов.

Ключевые слова: неидеальная гексагональная нанорешетка, микропоры-резонаторы, дефекты структуры, экситоноподобные возбуждения, приближение виртуального кристалла.

Введение. В настоящее время имеется значительное число работ посвященных исследованиям оптических свойств физических систем наноструктурного масштаба [1-5]. Актуальность таких исследований обусловлена как современным уровнем развития нанотехнологий и нанофотоники [6-8], так и необходимостью создания многофункциональных материалов с заданными свойствами [9-10]. Применительно к топологически упорядоченным нанокристаллическим системам микропор решение указанных задач предполагает известные состояния экситоноподобных и поляритонных (при наличии квантовых точек) возбуждений и детальный анализ их спектральных характеристик [11-12]. Методика их расчета разработана в работах [11-12], там же и проиллюстрированы, на простейших примерах, нанокристаллы с квадратной решеткой. В настоящей работе рассматриваются более сложные системы – нанокристаллические гексагональные двумерные решетки с двумя структурными элементами в элементарной ячейке (см. рис. 1, рис. 2).

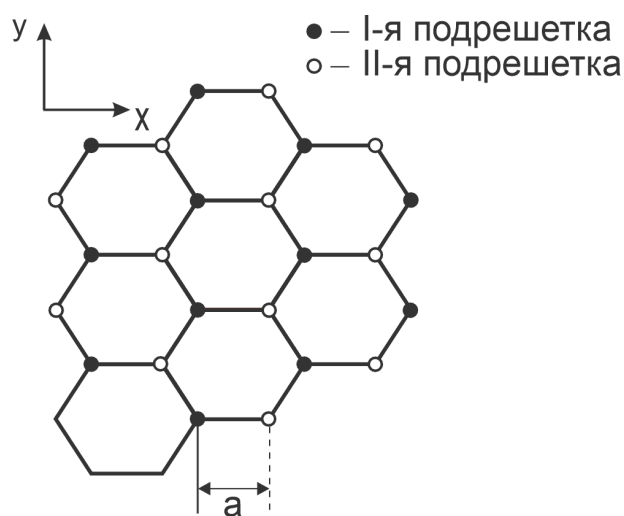


Рис. 1. Гексагональная двухподрешеточная двумерная решетка

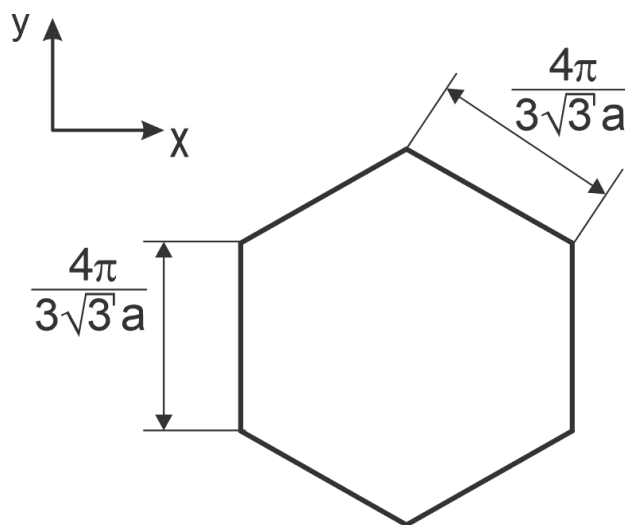


Рис. 2. Первая зона Бриллюэна для двухподрешеточного гексагонального кристалла

Ниже выполнен расчет спектров экситоноподобных возбуждений как для идеальных систем, так и для систем с точечными дефектами (вакансиями во второй подрешетке).

Гамильтониан $\hat{H}$ рассматриваемой системы, определяющий ее экситоноподобное состояние, является квадратичной формулой по бозе-операторам рождения $\psi_{\vec{n}\alpha}^\dagger$ и уничтожения $\psi_{\vec{m}\beta}$ фотонных возбуждений:

$$\hat{H} = \sum_{\vec{n}\alpha, \vec{m}\beta} A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta} \psi_{\vec{n}\alpha}^\dagger \psi_{\vec{m}\beta},$$

здесь $\vec{n}, \vec{m}$ – целочисленные векторы двумерной нанокристаллической решетки; α, β – индексы определяющие номера подрешеток (в нашем случае $\alpha, \beta \div 1, 2$); матрица $A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta}$ является функцией от конфигурации точечных дефектов; $E_{\vec{n}\alpha} \equiv A_{\vec{n}\alpha\vec{n}\alpha}$ – частота фотонной моды электромагнитного возбуждения, локализованного в $\vec{n}\alpha$ -узле; $A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta}(\delta_{\vec{n}\vec{m}}\delta_{\alpha\beta} - 1)$ – матрица резонансного взаимодействия, характеризующая перекрытие оптических полей резонаторов $\vec{n}\alpha$ и $\vec{m}\beta$ узлов решетки и следовательно, определяющего вероятность перескока соответствующего электромагнитного возбуждения.

Для рассматриваемой неупорядоченной системы вычисление собственных значений оператора 1 может быть выполнено, лишь используя определенное приближение.

В настоящей работе, для нахождения спектра искомых электромагнитных возбуждений используется приближение виртуального кристалла (ПВК), в соответствии с которым матрица $A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta}$ заменяется на конфигурационно усредненную, трансляционно инвариантную матрицу $\langle A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta} \rangle$ (угловые скобки обозначают математическую операцию конфигурационного усреднения) и дальнейший расчет спектра $\Omega(\vec{k})$ ($\vec{k}$ – двумерный волновой вектор) проводится стандартным методом [11].

В результате проведенных вычислений, аналитическое выражение для искомой частоты указанных квазичастиц имеет следующий вид:

$$\Omega_{1,2}(\vec{k}) = \frac{1}{2\hbar} \left\{ L_{11}(\vec{k}) + L_{22}(\vec{k}) \pm \sqrt{[L_{11}(\vec{k}) - L_{22}(\vec{k})]^2 + 4L_{12}(\vec{k})L_{21}(\vec{k})} \right\}. \quad (1)$$

Величины $L_{\alpha\beta}(\vec{k})$, фигурирующие в (1) связаны с $\langle A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta} \rangle$ следующим образом:

$$L_{\alpha\beta}(k) = \langle E_{\vec{n}\alpha} \rangle \delta_{\alpha\beta} + \sum_{\vec{m}} \langle A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta} (\delta_{\vec{n}\vec{m}} \delta_{\alpha\beta} - 1) \rangle \exp[i\vec{k}(\vec{r}_{\vec{n}\alpha} - \vec{r}_{\vec{m}\beta})].$$

В приближении ближайших соседей, величины $L_{11}(\vec{k}), L_{22}(\vec{k}), L_{12}(\vec{k}), L_{21}(\vec{k})$, как следует из рис.1 имеет следующий вид:

$$L_{11}(\vec{k}) = \langle E_1 \rangle - 2 \langle A_{11}(\sqrt{3}a) \rangle \left\{ \cos \left(k_x \frac{3}{2}a + k_y \frac{\sqrt{3}}{2}a \right) + \cos(k_y \sqrt{3}a) + \right. \\ \left. + \cos \left[k_x \frac{3}{2}a + k_y \left(\sqrt{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) a \right] \right\},$$

$$L_{22}(\vec{k}) = \langle E_2 \rangle - 2 \langle A_{22}(\sqrt{3}a) \rangle \left\{ \cos \left(k_x \frac{3}{2}a + k_y \frac{\sqrt{3}}{2}a \right) + \cos(k_y \sqrt{3}a) + \right. \\ \left. + \cos \left[k_x \frac{3}{2}a + k_y \left(\sqrt{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) a \right] \right\},$$

$$L_{12}(\vec{k})L_{21}(\vec{k}) = \langle A_{12}(a) \rangle \langle A_{21}(a) \rangle \left[3 + 2 \cos \left(a \left(\frac{3}{2}k_x - \frac{\sqrt{3}}{2}k_y \right) \right) + 2 \cos(ak_y \sqrt{3}) \right. \\ \left. + 2 \cos \left(a \left(\frac{3}{2}k_x + \frac{\sqrt{3}}{2}k_y \right) \right) \right]$$

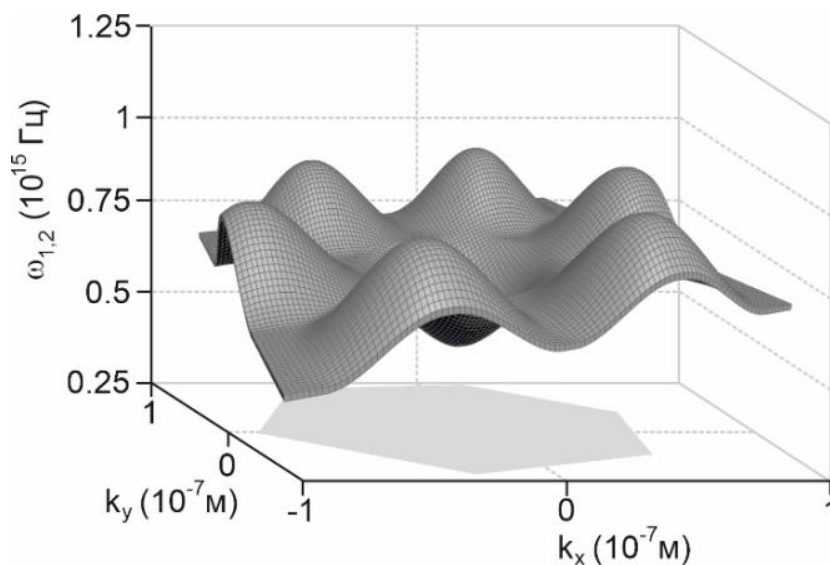
Для рассматриваемой системы, в которой имеются вакансии лишь во второй подрешетке, от их концентрации C^v зависят величины $L_{22}(\vec{k})$ и $L_{12}(\vec{k}), L_{21}(\vec{k})$ и $\langle E_2 \rangle$.

Как следует из работы [11] указанная зависимость находится путем следующей замены в (1):

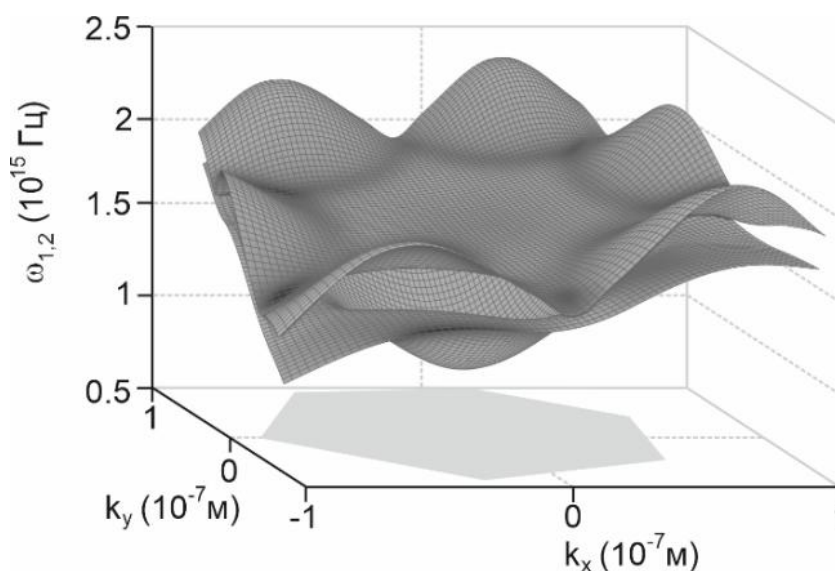
$$\langle E_2 \rangle \rightarrow E_2(1 - C^v), \langle A_{22}(\sqrt{3}a) \rangle \rightarrow A_{22}(\sqrt{3}a)(1 - C^v)^2, \\ \langle A_{12}(a) \rangle \langle A_{21}(a) \rangle \rightarrow A_{12}(a)A_{21}(a)(1 - C^v)^2$$

где $A_{22}(\sqrt{3}a), A_{12}(a), A_{21}(a)$ соответствует идеальному кристаллу.

Сравнивая график функции $\Omega_{1,2}(\vec{k}, C^v)$ на рис. 3 с соответствующими графиками в [11] видно, что законы дисперсии экситоноподобных возбуждений для рассматриваемой системы имеют более сложный характер, большее число критических точек, большее число топологических особенностей и их типов, чем [11].



а)



б)

Рис. 3. Графическое изображение дисперсионной зависимости экситоноподобных возбуждений описываемых формулой (1). Двумерный волновой вектор $\vec{k}$, изменяется в пределах первой зоне Бриллюэна. Расчеты были выполнены:

а) при значениях концентрации $C_1^V = 0,9$, б) при значениях концентрации $C^V = 0,2$

Учитывая, что зависимость дисперсионных характеристик от постоянной решетки a , также описывается более сложной функцией, чем в работах [11], то все сказанное указывает на возможность более широкого практического применения полученных в настоящей работе результатов.

Для несимморфных групп, характеризующих симметрию рассматриваемой нанокристаллической решетки, имеются дополнительные особенности дисперсионных характеристик, которые будут рассмотрены отдельно. На рис. 4 показана концентрационная зависимость запрещенной щели.

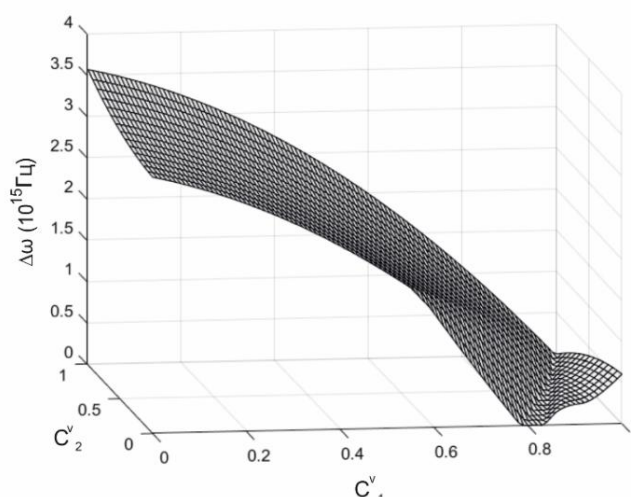


Рис. 4. Концентрационная зависимость запрещенной щели

Заключение. Полученные в настоящей работе результаты позволяют проводить численное моделирование дисперсионных и зонных характеристик экситоноподобных возбуждений в неидеальных гексагональных сложных нанорешетках микропор и выявлять особенности эти характеристик. Проведенные исследования расширяют возможности функциональных пористых материалов как путем управляемого внедрения в них структурных дефектов, так и путем изменения симметрии решетки Браве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Deterministic photon-emitter coupling in chiral photonic circuits / I. Söllner, S. Mahmoodian, S. Hansen [et al] // Nature Nanotechnology. – 2015. – V. 10. – P. 775-778.
2. Lodahl, P. Quantum-dot based photonic quantum networks / P. Lodahl // Quantum Science and Technology. – 2018. – V. 3. – P. 013001.
3. Experimental observation of bulk and edge transport in photonic Lieb lattices / D. Guzman-Silva, C. Mejia-Cortes, M. A. Bandres [et al] // New Journal of Physics. – 2014. – V. 16. – P. 063061.
4. Observation of Localized States in Lieb Photonic Lattices / R. Vicencio, C. Cantillano, L. Morales [et al] // Phys. Rev. Lett. – 2015. – V. 114. – P. 245503.
5. Unconventional flatband Line states in photonic Lieb lattices / S. Xia, A. Ramachandran, S. Xia [et al] // Physical Review Letters. – 2018. – V. 121. – Iss. 26. – P. 263902.
6. Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator / T. Aoki, B. Dayan, E. Wilcut [et al] // Nature. – 2006. – V. 443. – P. 671.
7. Strongly interacting polaritons in coupled arrays of cavities / M. J. Hartmann, F. Brandao, M. B. Plenio // Nature. – 2006. – V. 2. – P. 849-855.
8. Coherent control of photon transmission: Slowing light in a coupled resonator waveguide doped with Λ atoms / L. Zhou, J. Lu, C. P. Sun // Phys. Rev. – 2007. – A 76. – P.012313.
9. Наноматериалы и нанотехнологии / Ж. И. Алферов, А. Л. Асеев, С. В. Гапонов [и др.] // Микросистемная техника. – 2023. – №8. – С. 3-13.
10. Modeling of nanometer scale physical objects / V. V. Rumyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk, A. E. Rybalka // Phys Sci Biophys J. – 2023. – V. 7 (1). – P. 000242.
11. Exciton-like electromagnetic excitations in non-ideal microcavity supercrystals / V. V. Rumyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk [et al] // Scientific Reports. – 2014. – V. 4. – P. 06945.
12. Паладян, Ю. А. Эффекты распространения электромагнитных и акустических возбуждений в несовершенных кристаллических средах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Паладян Юлия Александровна; ДОНФТИ. – Донецк, 2022. – 112 с.

Поступила в редакцию 10.12.2024 г., рекомендована к печати 10.01.2025 г.

EXCITON-LIKE EXCITATIONS IN IMPERFECT HEXAGONAL NANOLATTICES OF
MICROPORES

Bezus I.U.A., Rybalka A.E., Rumiantsev V.V., Fedorov S.A., Bezus A.V.

The features of the spectrum of exciton-like excitations are investigated both for ideal systems and for systems with point defects (vacancies in the second sublattice). It is determined that the laws of dispersion for the system under consideration have a more complex character, a greater number of critical points, a greater number of topological features and their types.

Keywords: imperfect hexagonal nanolattice, micropore resonators, structural defects, exciton-like excitations, virtual crystal approximation.

Безус Юлия Александровна

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: paladyan0108@yandex.ru

Bezus Iuliia Aleksandrovna

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Research Assistant of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Рыбалка Алексей Евгеньевич

младший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: rybalka96@inbox.ru

Rybalka Aleksei Evgenevich

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

Румянцев Владимир Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: vladimir.rumyantsev2011@yandex.ru

Rumiantsev Vladimir Vasilevich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor, Chief Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Федоров Станислав Афанасьевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: s.fedorov2023@yandex.ru

Fedorov Stanislav Afanasevich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Безус Алексей Викторович

кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики и дидактики физики ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: a.bezus@mail.ru

Bezus Aleksei Viktorovich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Head of the Department of General Physics and Didactics of Physics of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk

ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРИ УСЛОВИИ МНОГОТОЧЕЧНОГО СБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

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

Отражены принципы, на основе которых осуществляется обратная связь между результатами математического моделирования процессов трансформации загрязняющих веществ в водотоках и данными режимных и специальных наблюдений, проводимых в режиме реального времени. При необходимости данные наблюдений корректируются с учетом результатов моделирования. Рассматриваются приоритетно эффективные и простые инструменты для прогнозирования качества водных объектов на примере искусственных нейронных сетей. В условиях неблагоприятной экологической ситуации встает актуальная проблема оценки состояния поверхностных вод, в которые попадают сточные воды от химических и металлургических предприятий, что возможно при более детальном оценивании и контроле изменения качества воды по длине водных объектов с оценкой влияния на это качество отдельных источников ЗВ.

Ключевые слова: контроль сточных вод, многоточечный сброс, модель прогнозирования, турбулентная диффузия, створ реки, входные и выходные данные, искусственные нейронные сети, трансформация ЗВ, математическое моделирование, измерительная станция.

Введение. Загрязнение водных объектов и окружающей среды в целом легкоокисляемыми органическими веществами возможно путем поступления в них сбросов производственных сточных вод различных отраслей промышленности: так, в производственных сточных водах химической промышленности наиболее характерными загрязняющими веществами (ЗВ) являются фенолы, синтетические поверхностные вещества, сложные органические соединения и комплексы тяжелых металлов (Hg, Fe, Zn, Pb).

В большинстве случаев точки наблюдения за водными объектами расположены так, чтобы охватить максимальное количество загрязняющих и биогенных веществ, которые попадают в реки со всей площади водосбора. Это позволяет оценить влияние хозяйственной и производственной деятельности на состояние водных объектов и определить их загрязнение.

В настоящее время перед нами встает проблема неточности расчетов и использования поправочных коэффициентов в математической модели для характеристики скорости трансформации загрязняющих веществ (ЗВ). Результаты моделирования могут быть неточными из-за влияния неучтенных источников поступления ЗВ. Это, в свою очередь, создает трудности в оценке и контроле качества поверхностных сточных вод.

Подходы и методы прогнозирования и оценки сточных вод. Методы контроля за сбросом сточных вод с загрязняющими веществами включают в себя: перечень абонентов, для объектов которых установлены НДС. При этом НДС устанавливались для определенных категорий абонентов согласно Постановлению Правительства РФ от 18.03.2013 № 230. Такой контроль будет проводиться в тех случаях, когда визуально можно обнаружить вещества, материалы, отходы и/или сточные воды, запрещенные к сбросу в ЦСВ (централизованную систему водоотведения). Контроль может осуществляться как в плановом, так и во внеплановом режиме. Плановый контроль проводится не чаще одного раза в календарный месяц и реже одного раза в календарный год [1].

В последние десятилетия методы прогнозирования стали более точными и эффективными, объединяя фактические данные и математические модели. Основная идея данного подхода заключается в создании математического инструментария, который поможет разделить информацию об изменениях в состоянии системы и её подсистем в зависимости от масштабов возникающих возмущений. Это позволит выделить наиболее значимые экологические процессы, связанные с водными биологическими ресурсами (ВБР), на основе заранее установленных критериев информативности.

В работах Наумова В.А. представлена математическая модель прогнозирования сбросов загрязняющих веществ предприятия в водные объекты, на точность распространения взвешенных примесей из точечного источника которого оказывает влияние коэффициент турбулентной диффузии дисперсной примеси и гидравлической крупности частиц. Специфика данных прогнозирований состоит в том, что в постановках задач необходимо учитывать обширный спектр взаимодействующих процессов (физических, химических, биологических) заданного (производственный участок и его окрестности в радиусе около 5 км) пространственно-временного масштаба [2].

Для аппроксимации процесса смешения и разбавления поступающих в водоток ЗВ использовано решение уравнения турбулентной дисперсии для одномерной плоской задачи точечного стационарного сброса ЗВ в русло реки с прямоугольным поперечным сечением. Для перехода к любому объёму поступающих в водоток водных масс их можно рассматривать как условный многоточечный сброс.

При исследовании процессов турбулентной диффузии в естественных водоемах со сложной морфологией при переменных граничных условиях этот чрезвычайно мощный математический аппарат становится громоздким и потому теряет свое главное преимущество в простоте.

$$\frac{dC}{dt} + V_x \frac{dC}{dx} + V_y \frac{dC}{dy} + V_z \frac{dC}{dz} = \frac{d}{dx} \left(D_x \frac{dC}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(D_y \frac{dC}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(D_z \frac{dC}{dz} \right) - F(s), \quad (1)$$

где C – концентрация загрязнения, мг/л; t – время, с; x – горизонтальная координата, м; y – поперечная координата, м; z – вертикальная координата, м; V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скорости, м/с; D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии по соответствующим направлениям; $F(S)$ – функция, характеризующая разложение загрязнения.

Уравнение (1) можно использовать в случае, когда распределение концентрации по живому сечению потока близко к равномерному. Однако это условие не выполняется, если в отдельных точках течения имеются области с повышенной концентрацией примеси, что приводит к ее неравномерному распределению по сечению. Такая картина наблюдается при поступлении в водоток загрязнений с производственными стоками, когда более высокие концентрации будут у берегов [3].

Помимо турбулентной диффузии, грунт переносится из одной части потока в другую за счёт конвекции. В упрощённом описании, когда конвективными процессами пренебрегают из-за извилистости реки и других факторов, приходится вносить поправки с помощью так называемого эффективного коэффициента диффузии, который учитывает все процессы. В работе Клеванного К.А. [4] дано описание используемых моделей, приведено описание расчёта мощностей источников загрязнения, обоснована возможность выполнения расчётов при задании средневзвешенной скорости оседания грунта, состоящего из частиц различных диаметров.

Так, программный комплекс для ПК «ГХМ-трансформ 3В» предназначен для проведения моделирования изменения концентраций 3В по длине водотока. Вводятся исходные данные задачи, определяющие параметры водного объекта, источников 3В, интенсивность протекающих процессов, где основной характеристикой задачи является понятие створа реки.

В контрольных створах, помимо уже имеющихся вертикалей наблюдения, обязательно дополнительно планируют отбор проб воды в самой загрязнённой струе. Загрязнённая струя в фоновом створе, сточные воды, воды притока, а также воды в каждом загрязнённом сегменте, перенесённые в узловой створ из замыкающего створа вышележащего участка реки разбивается на несколько условно точечных выпусков в виде сегментов в створе реки. Если требуется моделирование для получения более точной информации о трансформации загрязняющих веществ вдоль реки на относительно небольших участках, планируют и проводят рекогносцировочные наблюдения. В ходе этих наблюдений отбирают пробы воды, учитывая время, необходимое загрязнённым массам воды, чтобы пройти между контрольными створами, а также максимальные скорости течения реки (например, для оценки влияния сброса сточных вод конкретного предприятия на качество речной воды). Это может быть хорошо отражено на примере оценок влияния сбросов сточных вод на качество верхнего течения р. Дон с её притоками.

Значительная часть экспериментальных данных по поперечному рассеиванию примеси в водотоках согласуется с эффективным коэффициентом $D_{э1}$. Данный коэффициент определяется в следующем виде [5]:

$$D_{э1} = 0,15 \frac{U_{cp} H \sqrt{g}}{C},$$

где U_{cp} – средняя скорость водотока, м/с; H – постоянная глубина, м; C – коэффициент Шези.

Целевые функционалы, используемые для объединения прогнозов, основанных на моделируемых функциях состояния и направляющих фазовых подпространствах, формируются по аналогии с функционалами, применяемыми для усвоения данных в моделях процессов. Они отражают степень отклонения искомой функции состояния от заданных векторов «фд», обеспечивая при этом минимизацию суммарной неопределенности в моделях процессов и входных данных для расчета сценариев моделирования. Например, целевой функционал для комплексирования функций состояния, рассчитываемых по численной модели процессов и соответствующих элементов НПФ в режиме усвоения можно записать в следующем виде:

$$\Phi_k(\phi) = \int_{Dt} F_k(\phi) X_k(x, t) dDdt \equiv (F_k, X_k), \quad X_k \subset Q^*(Dt), \quad k = \overline{1, Kc},$$

где $F_k(\phi)$ – оцениваемые функции заданного вида, ограниченные и дифференцируемые относительно $\phi \in Q(Dt)$; $X_k(x, t) \geq 0$, $X_k(x, t) dDdt$ – неотрицательные весовые функции и соответствующие им меры Радона (в случае распределенных по пространству значений функций $F_k(\phi)$) или Дирака (в случае, если $F_k(\phi)$ определено на совокупности дискретных точек в области Dt); $Q^*(Dt)$ – пространство сопряженных функций. Носители весовых функций, т. е. области их ненулевых значений, можно интерпретировать как области-рецепторы в Dt , конфигурации которых задаются как входные параметры в конструкциях.

Метод Фролова В.А. – Родзиллера И.Д. нашел наибольшее распространение из-за своей простоты и небольшого объема вычислительных работ [3]. Его целесообразно применять для больших и средних рек при оценочных расчетах; когда решается вопрос о возможности сброса сточных вод в реку. Для использования информации в целях экологического прогнозирования подходит любая база данных, имеющая в своем составе характеристики за длительный период времени. Так, для небольших рек, где учет поступления загрязненной воды через береговую линию особенно актуален, расход воды по длине реки будет переменной величиной. Поэтому при прогнозировании влияния поступающего поверхностного стока на качество воды такой реки расход воды в ней следует принимать переменным.

Модельные параметры, характеризующие водоем, могут существенно различаться для разных его частей. Модели идеального (поршневого) вытеснения применяются для водотоков, когда сброс загрязняющих веществ осуществляется непрерывно, а водопользование осуществляется на значительном удалении от источника. В таких моделях не учитывается продольная дисперсия радионуклидов, а в поперечном сечении русла предполагается идеальное перемешивание. Для более точного учета или уточнения результатов моделирования путем введения поправочных коэффициентов необходимо проанализировать все данные наблюдений и моделирования, полученные в разные годы и сезоны годового цикла. Для расчета поверхностного стока в случае его перехвата системой дождевой канализации, балками, ручьями, оврагами могут использоваться те же методы, что и для сосредоточенных выпусков бытовых сточных вод. Учитывая, что дождевая канализация обычно имеет несколько выпусков, данную задачу необходимо свести к определению воздействия на водоем множества выпусков [6].

Здесь следует отметить, что число отрезков береговой линии должно диктоваться требованиями к тщательности прогноза. Информация по участкам реки является опорной для всех видов входных данных (при вводе других видов информации автоматически проводится проверка на непротиворечивость вводимых данных параметрам участков реки).

В контрольных створах рассчитывают невязку (разницу) между расчетными и наблюдаемыми концентрациями ЗВ в максимально загрязненной струе. С одной стороны, эти данные являются результатом неточности расчета и использования в математической модели поправочных коэффициентов, характеризующих скорость трансформации ЗВ по длине реки; с другой стороны, невязка может характеризовать погрешность полученных результатов моделирования, обусловленную влиянием на формирование ЗВ неучтенных источников поступления ЗВ в водоток или факторов, способствующих их интенсивному изъятию из водотока.

Как известно, генерация прогнозов может основываться на статистических или детерминированных моделях. Имеются анализы, основанные на моделировании метеорологических полей и дисперсий загрязнения в детерминированных моделях.

В последнее время наблюдается интенсивное развитие алгоритмов в искусственном интеллекте. Искусственные нейронные сети (ИНС) были одними из первых алгоритмов этого типа. Их характерная особенность заключается в том, что они могут быть использованы для решения проблемы в условиях неполной информации без знания аналитической зависимости между входными и выходными данными. Эта особенность приводит к тому, что ИНС являются очень важным инструментом для моделирования сложных неизвестных отношений между переменными.

Допускается одинаковое распределение различий между измеренным значением и прогнозируемым значением для каждой измерительной станции при проведении адаптации такого инструмента как нейронные сети для целей автоматизированного мониторинга загрязнения водных объектов, прогнозирования их состояния при возникновении аварийных выбросов, в том числе многоточечных выбросов загрязняющих веществ. Не предоставляется возможным создать универсальную модель нейронной сети, которая будет одинаково хорошо работать для всех загрязнителей и на всех типах местности, где проходят поверхностные сточные воды.

Выбор архитектуры нейронной сети, включая количество и тип нейронов, а также алгоритма обучения, имеет решающее значение для её эффективности. Модель и архитектура нейронной сети должны быть адаптированы к каждому конкретному случаю. Подобные нейронные сети используются в различных автоматизированных системах мониторинга сбросов загрязняющих веществ предприятиями в водные объекты. Блок сбора и обработки данных такой системы представляет собой сложный многокомпонентный комплекс, включающий в себя передовое оборудование и программное обеспечение. В его основе лежит многофункциональный телеметрический комплекс, построенный на базе промышленных контроллеров, обеспечивающих надежность и непрерывность работы. Этот комплекс неразрывно связан с несколькими критическими подсистемами, обеспечивающими его бесперебойную функциональность. Подсистема бесперебойного питания гарантирует стабильное электропитание даже при внезапных отключениях, предотвращая потерю данных и сбои в работе. Подсистема контроля микроклимата поддерживает оптимальные температурные и влажностные условия для корректной работы всего оборудования, исключая влияние внешних факторов на точность измерений. Защита данных и физического доступа к оборудованию обеспечивается надежной подсистемой контроля доступа, предотвращающей несанкционированное вмешательство и гарантируя сохранность информации. Для передачи данных используется современная подсистема сетевых коммуникаций, дополненная надежной системой шифрования, обеспечивающей конфиденциальность передаваемой информации и защиту от несанкционированного доступа к ней. Эта система шифрования защищает чувствительные данные на всех этапах передачи, от сбора до хранения. Основная задача этого комплекса – сбор и обработка данных о контролируемой среде. Это достигается с помощью высокоточного измерительного оборудования, установленного на стационарных постах наблюдения. Измерительные приборы непрерывно собирают данные о различных параметрах окружающей среды, передавая их на центральный телеметрический комплекс. Затем, используя утвержденные и проверенные алгоритмы (детализированные в источнике [7]), комплекс рассчитывает параметры выбросов и сбросов вредных веществ, обеспечивая точный анализ экологической ситуации. Все собранные данные с каждого стационарного поста поступают на центральный сервер приема и обработки данных. Этот сервер оснащен специализированным программным обеспечением, которое устанавливает зашифрованное Интернет-соединение с контроллером телеметрии каждого поста. Полученные данные, уже зашифрованные на уровне поста, передаются на сервер, где происходит их расшифровка и последующая обработка. После обработки данные тщательно проверяются на наличие ошибок и несоответствий, а затем надежно хранятся в защищенной базе данных. Эта база данных обеспечивает долговременное хранение информации, позволяя проводить анализ данных за длительные периоды времени и выявлять долгосрочные тенденции.

Наконец, обработанные и верифицированные данные предоставляются пользователю через удобный и интуитивно понятный пользовательский интерфейс, позволяющий анализировать информацию в различных форматах и получать наглядные отчеты. Все этапы работы системы, от сбора данных до их представления пользователю, максимально автоматизированы и оптимизированы для обеспечения высокой точности, надежности и эффективности. Пример функциональной схемы работы автоматизированной системы непрерывного контроля сбросов загрязняющих веществ предприятий в водные объекты представлен на рис. 1.

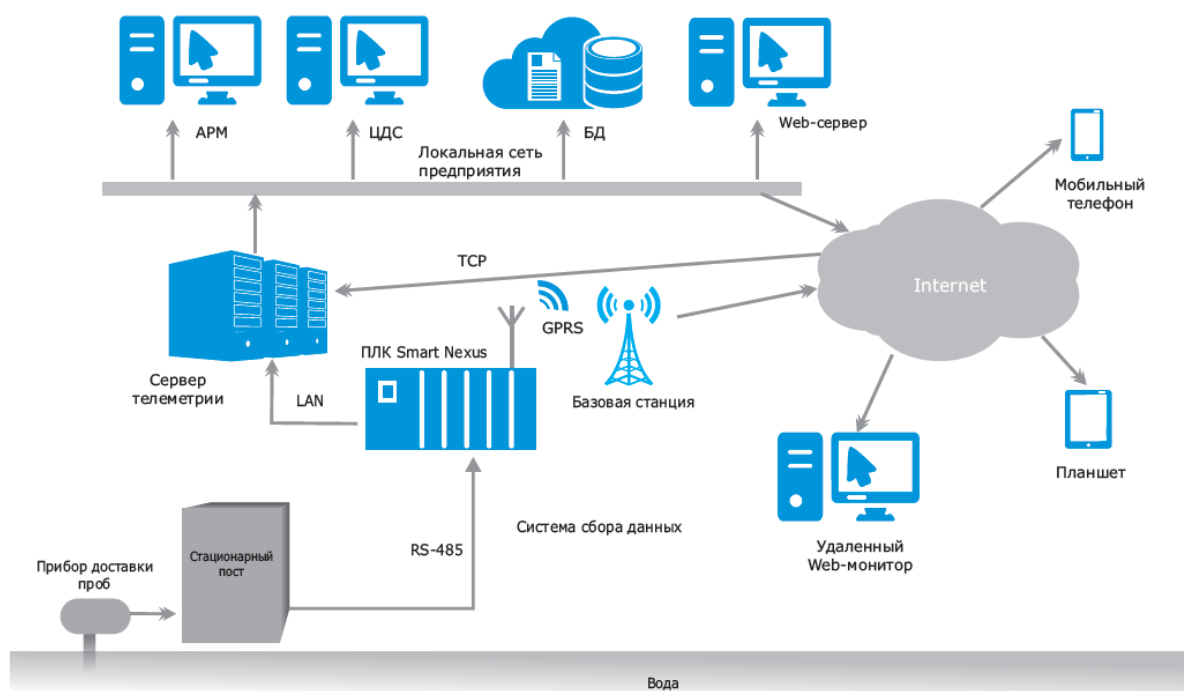


Рис. 1. Функциональная схема работы автоматизированной системы непрерывного контроля сбросов загрязняющих веществ предприятий в водные объекты

Пример стационарной береговой автоматической станции многокомпонентного контроля качества сточных вод показан на рис. 2. В состав измерительного оборудования входят: измеритель объемного расхода, автоматический анализатор для определения ХПК, датчики измерения концентрации загрязняющих веществ (зависит от типа производства и технологических процессов), прибор для определения уровня pH, датчик измерения температуры, датчик взвешенных веществ. Стоит отметить, что не всегда достоверна статистика сбросов загрязняющих веществ предприятиями. Отсутствуют методики оценки неконтролируемого (диффузного) стока и вторичного загрязнения от донных отложений. Методы, используемые для регламентации сбросов, внутренне противоречивы и неэффективны, что характерно для большинства регионов. Также существует проблема использования устаревшей приборной базы для мониторинга поверхностных водных объектов (ПВО). Однако эта проблема успешно решается в рамках федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2035 года».



Рис. 2. Стационарная береговая автоматическая станция многокомпонентного контроля качества сточных вод

Между тем, большинство исследований сосредоточено на краткосрочных и долгосрочных прогнозах уровней концентрации сложных органических соединений и взвешенных частиц тяжелых металлов при контроле сточных вод и последующей их очистке. Для действующих выпусков сточных вод рекомендуется использовать информацию из согласованных проектов нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты. В этих проектах содержатся измеренные в течение 1–3 лет концентрации загрязняющих веществ в сточных водах и фактические среднегодовые расходы.

С помощью данных, полученных автоматизированной системой непрерывного контроля сбросов загрязняющих веществ предприятий в водные объекты с использованием ИНС было проведено моделирование изменения концентрации веществ на АО «Тула-горводоканал», АО «НАК «Азот» и ОАО «Щекиноазот» (Тульская область). Проанализировав результаты, можно сделать вывод по превышающим концентрациям ЗВ в зоне начального разбавления. На основе этих данных при заданных условиях можно составить прогнозные значения концентраций ЗВ по времени и расстоянию от источника. Экспериментальные данные, подтверждающие эффективность описанных методов, можно найти в [8, 9].

Выводы. Таким образом, при оценивании состояния поверхностных сточных вод статистика сбросов предприятиями загрязняющих веществ не всегда достоверна, отсутствуют методики оценки неконтролируемого (диффузного) стока и вторичных загрязнений от донных осадков, а сами методы регламентации внутренне противоречивы и малоэффективны.

В рамках реализуемых проектов и программ особое внимание уделяется созданию и внедрению автоматизированных систем мониторинга состояния водных объектов. Эти системы призваны оказывать поддержку в принятии управленческих решений, в том числе используя современные методы с искусственными нейронными сетями. Для получения точных результатов крайне важно правильно подобрать входные и выходные данные, которые должны быть тесно связаны между собой.

Невозможно создать единую универсальную модель нейронной сети, способную прогнозировать выбросы различных загрязняющих веществ в различных регионах.

На сегодняшний день требуется обострять внимание на эффективность целенаправленной ликвидации посредством точного мониторинга стоков загрязнения с большим обхватом данных по автоматическому измерению показателей сбросов загрязняющих веществ и по площади наблюдения за изменением показателей в исследуемом объекте. На основе данных методов контроля можно разработать оценку объёмов сброса загрязняющих веществ в водные объекты, используя методологию наилучших доступных технологий. Также следует рассчитывать, насколько необходимо сокращать эти сбросы, чтобы предотвратить ухудшение экологической ситуации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. К вопросу о разработке информационно-справочной системы АтлантНИРО / Ф. В. Коломейко, А. В. Зуев, В. Н. Щур [и др.] // Материалы конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового Океана». – Владивосток, 2004. – С. 106-107.
2. Наумов, В. А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водотоке / В. А. Наумов // Известия КГТУ. – 2017. – №44. – С. 46-58.
3. Абдурасулов, И. Л. Моделирование воздействия сточных вод на состояние поверхностных вод / И. Л. Абдурасулов, А. М. Бажиева // Наука и новые технологии. – 2012. – № 3. – С. 60-62.
4. Распространение взвеси и ее воздействие на биоту при дноуглублении в Кольском заливе (Баренцево море). 1. Исходные данные и используемые модели / К. А. Клеванный, Е. В. Смирнова, А. А. Шавыкин, П. С. Ващенко // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 3. – С. 18-24.
5. Волюнов, М. А. Влияние плановой геометрии речного русла на диффузию и дисперсию примеси / М. А. Волюнов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6-3. – С. 535-540.
6. Кондюрина, Т. А. Математическая модель процессов смешения сточных вод в водотоках / Т. А. Кондюрина, Г. В. Филькин // Труды Южгипроводхоза. – Ростов-на-Дону, 1990. – С. 136-140.
7. Автономная система дистанционного мониторинга поверхностных водных объектов для оперативного контроля в реальном масштабе времени / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Е. М. Рылеева, С. А. Савинкова // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 4. – С. 50-55.
8. Разработка математической модели прогноза загрязнения окружающей среды промышленно развитых регионов/ В. М. Панарин, А. А. Маслова, К. В. Гришаков [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2023. – № 1. – С.17-24.
9. Мешалкин, В. П. Нейронные сети в автоматизированной системе мониторинга состояния окружающей среды / В. П. Мешалкин, В. М. Панарин, А. А. Маслова // Sciences of Europe. – 2020. – № 50-2(50). – С. 14-20.

Поступила в редакцию 30.01.2025 г., рекомендована к печати 17.02.2025 г.

REVIEW OF WASTEWATER CONTROL AND EVALUATION METHODS UNDER MULTIPLE-
POINT DISCHARGE OF POLLUTANTS

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

The principles on the basis of which feedback is carried out between the results of mathematical modeling of the processes of transformation of pollutants in watercourses and the data of regime and special observations carried out in real time are reflected. If necessary, the observation data are adjusted taking into account the modeling results. The article considers the priority effective and simple tools for forecasting the quality of water bodies using the example of artificial neural networks. In the conditions of an unfavorable environmental situation, an urgent problem arises of assessing the state of surface waters, into which wastewater from chemical and metallurgical enterprises gets, which is possible with a more detailed assessment and control of changes in water quality along the length of water bodies with an assessment of the impact of individual sources of pollutants on this quality.

Keywords: wastewater control, multipoint discharge, forecasting model, turbulent diffusion, river section, input and output data, artificial neural networks, transformation of pollutants, mathematical modeling, measuring station.

Панарин Владимир Михайлович

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

Panarin Vladimir Mikhailovich

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

Маслова Анна Александровна

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

Maslova Anna Aleksandrovna

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

Рылеева Евгения Михайловна

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

Ryleeva Evgeniia Mikhailovna

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

Браун Владислав Александрович

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

Braun Vladislav Aleksandrovich

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

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

© 2025 *Пометун Е.Д., Лебедев В.Н.*

В статье приводится описание автоматизированной системы для измерения параметров турбулентности в неизотермических газовых потоках. Предлагаемый способ измерения позволяет сократить временные и материальные затраты путем упрощения процедуры градуировки датчика термоанемометра. Описаны основные компоненты автоматизированной системы, методы обработки сигналов и алгоритмы анализа турбулентных потоков. Приведены результаты экспериментальных испытаний, подтверждающие эффективность предложенного решения.

Ключевые слова: турбулентность, автоматизированная система, термоанемометр, термокомпенсация.

Введение. Турбулентность представляет собой сложный, и в ряде случаев, недостаточно изученный процесс в аэродинамике, оказывающий влияние на широкий спектр природных и технологических процессов. Измерение параметров газовых потоков, таких как пульсации скорости, необходимо при проектировании авиационной техники, энергетических установок, систем вентиляции и климатических исследований. Одним из наиболее распространённых инструментов для измерений параметров газовых потоков является проволочный термоанемометр постоянной температуры, обеспечивающий высокую чувствительность и малую инерционность, обусловленную использованием ниточного чувствительного элемента диаметром несколько микрометров ($5\text{ мкм} \div 8\text{ мкм}$) [1]. Однако существенным недостатком данного метода является низкая надёжность проволочных датчиков, обусловленная загрязнением и выходом из строя тонкой нити. Замена нити требует повторной градуировки по скорости и температуре, что связано с использованием сложного стендового оборудования и значительными временными затратами. В связи с этим актуальной задачей становится разработка упрощённых методов градуировки, сохраняющих точность измерений при минимизации ресурсных затрат.

В данной статье предложен упрощённый способ градуировки термоанемометра, основанный на измерении выходного напряжения датчика при нулевой скорости потока. Способ исключает необходимость многопараметрической градуировки (по температуре и скорости) и заключается в преобразовании аналитических зависимостей теплообмена [2]. Результаты работы демонстрируют возможность применения данного способа в широком диапазоне параметров, включая неизотермические потоки, что делает его перспективным для автоматизированных систем измерения параметров турбулентности [3-5].

Основная часть. Тепловые контактные методы измерения интенсивности турбулентности основаны на применении термоанемометров, в частности, с проволочными первичными преобразователями. Несмотря на высокие точностные характеристики микропроволочных датчиков, их эксплуатационная надёжность остаётся фактором, существенным ограничивающим широкое использование в автоматизированных системах сбора и анализа данных.

Способ, описанный в данной статье, основан на измерении единственного параметра — выходного напряжения термоанемометра при отсутствии скорости набегающего газового потока. Анализ теплообмена нагретой нити показывает, что запись уравнений в относительных величинах позволяет существенно сократить количество переменных и привести итоговую зависимость к функции двух величин: начальному смещению выходного электрического сигнала и показателю степени n в уравнении теплообмена [6, 7]. Если после замены нити, конструктивные параметры датчика остаются неизменными (диаметр нити и форма державок), то показатель степени сохраняется, и градуировку можно проводить, измеряя только выходное электрическое напряжение термоанемометра при отсутствии скорости потока ($V=0$), что исключает необходимость использования сложных стендов и трудоемких процедур обработки большого объема экспериментальных данных при разных скоростях и температурах потока. Следовательно, если после замены нити конструкция датчика не изменилась, тогда можно исключить такие этапы, как определение аналитической зависимости выходного электрического параметра от температуры (термокомпенсацию) и построение линеаризующего полинома, то есть сложную градуировку датчика по скорости и температуре.

Для измерения интенсивности турбулентности с помощью восстановленного датчика достаточно измерить выходное напряжение термоанемометра постоянной температуры без снятия защитного колпачка, ограничивающего конвективные потоки, и ввести это значение в программу обработки данных. При первом использовании датчика показатель степени определяется по литературным данным или путем калибровки в нескольких точках при одной температуре. Полученные зависимости заносятся в память микропроцессорного устройства и применяются для расчёта интенсивности турбулентности. Этот способ измерения не требует специализированных аэродинамических стендов и позволяет значительно сэкономить время на градуировку.

Данная методика применима в области аэродинамических измерений, включая определение интенсивности турбулентности в аэродинамических трубах, атмосфере, а также исследования структуры нестационарных и неизотермических потоков, как в научных исследованиях, так и при решении инженерных задач [8].

Интенсивность турбулентности (в процентах) определяется уравнением:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(U' - \bar{U})^2}}{\bar{U}} * 100\%, \quad (1)$$

где: U' - мгновенное значение скорости потока; $\bar{U}$ – средняя скорость потока.

После преобразования уравнений теплообмена нагретой нити, критерий Нуссельта можно записать в виде [1, 7]:

$$Nu = A + B Re^2, \quad (2)$$

где: Nu – число Нуссельта; A , B – константы; Re – число Рейнольдса; n – показатель степени.

В неизотермическом потоке изменяются начальное и текущее выходное напряжение термоанемометра, так что, уравнение (2) для термоанемометра постоянного сопротивления (температуры) можно преобразовать к виду [6]:

$$f(t) * (E_{TA}^2 - E_0^2) = B_1 Re^n, \quad (3)$$

где: $f(t)$ - функция, определяющая температурную зависимость; E_{TA} , E_0 – соответственно, текущее и начальное значение выходного напряжения термоанемометра, B_1 – константа.

После подстановки уравнения (3) в (1) и ряда сокращений, получаем преобразованное уравнение [2]:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\left(\left(E_{TA_i}^2 - E_0^2 \right)^{1/n} - \left(\overline{E_{TA}}^2 - E_0^2 \right)^{1/n} \right)^2}}{\left(\overline{E_{TA}}^2 - E_0^2 \right)^{1/n}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Уравнение (4) содержит две постоянных величины: начальное напряжение (ток) термоанемометра, измеренное при отсутствии скорости потока, обтекающего нить, и степень n в уравнении Кинга (2). Таким образом, перед началом измерений интенсивности турбулентности с помощью проволочного датчика, достаточно измерить начальное электрическое напряжение (ток) при нулевой скорости потока и установить показатель степени. Хранение и транспортировка проволочного датчика, как правило, осуществляется с применением колпачка, закрывающего нить от пыли и случайных прикосновений. Для измерения начального напряжения необходимо измерить выходное напряжение или ток термоанемометра без снятия защитного колпачка. Вторая величина — показатель степени n в уравнении Кинга — обычно принимается равным 0,5. Однако экспериментально было установлено, что этот показатель может различаться для датчиков разного типа. Важной особенностью показателя степени является его стабильность для датчиков с одинаковой конструкцией (таких как диаметр нити и форма державок). Если после замены нити конструкция датчика остается прежней, то показатель степени сохраняется.

Алгоритм измерения и обработки данных параметров турбулентности газового потока по упрощенному способу градуировки датчика термоанемометра приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Алгоритм измерения интенсивности турбулентности по упрощенной методике градуировке датчика термоанемометра в 1 точке потока

Алгоритм измерения интенсивности турбулентности с использованием упрощённой процедуры градуировки датчика термоанемометра реализован в среде графического программирования LabVIEW SignalExpress. Способ основан на предварительной калибровке по нескольким точкам скорости для вычисления показателя степени n в уравнении (4) с последующей автоматизированной обработкой сигнала, включающей фильтрацию, статистический анализ и расчёт турбулентных характеристик. Применение LabVIEW SignalExpress позволяет упростить сбор выходных данных, их визуализацию и сохранение для дальнейшего анализа.

Окно разработанной виртуальной лаборатории в LabVIEW SignalExpress приведено на рисунке 2. Виртуальная лаборатория представляет собой автоматизированную измерительную систему, предназначенную для исследования параметров газового потока с использованием термоанемометра постоянной температуры. Данная система позволяет выполнять измерение скорости потока, расчет интенсивности турбулентности, регистрацию и визуализацию полученных данных.

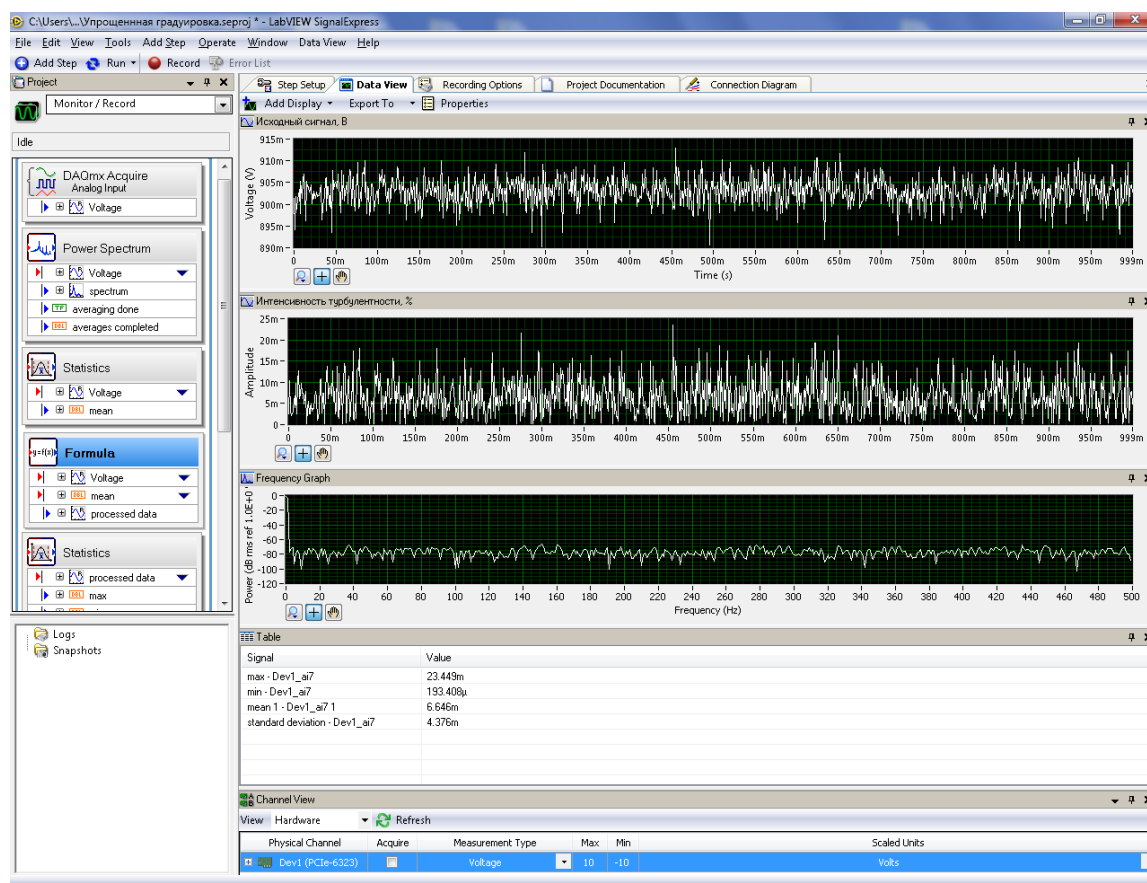


Рис. 2. Окно программы

Для проверки работоспособности алгоритма, изображенного на рисунке 1, и разработанной автоматизированной системы измерения параметров газового потока была выполнена серия измерений на аэродинамическом стенде АДС 200/250 [7]. На рисунке 3 приведены зависимости интенсивности турбулентности от координаты на срезе конфузора аэродинамической трубы (АТ) при различных скоростях газового потока.

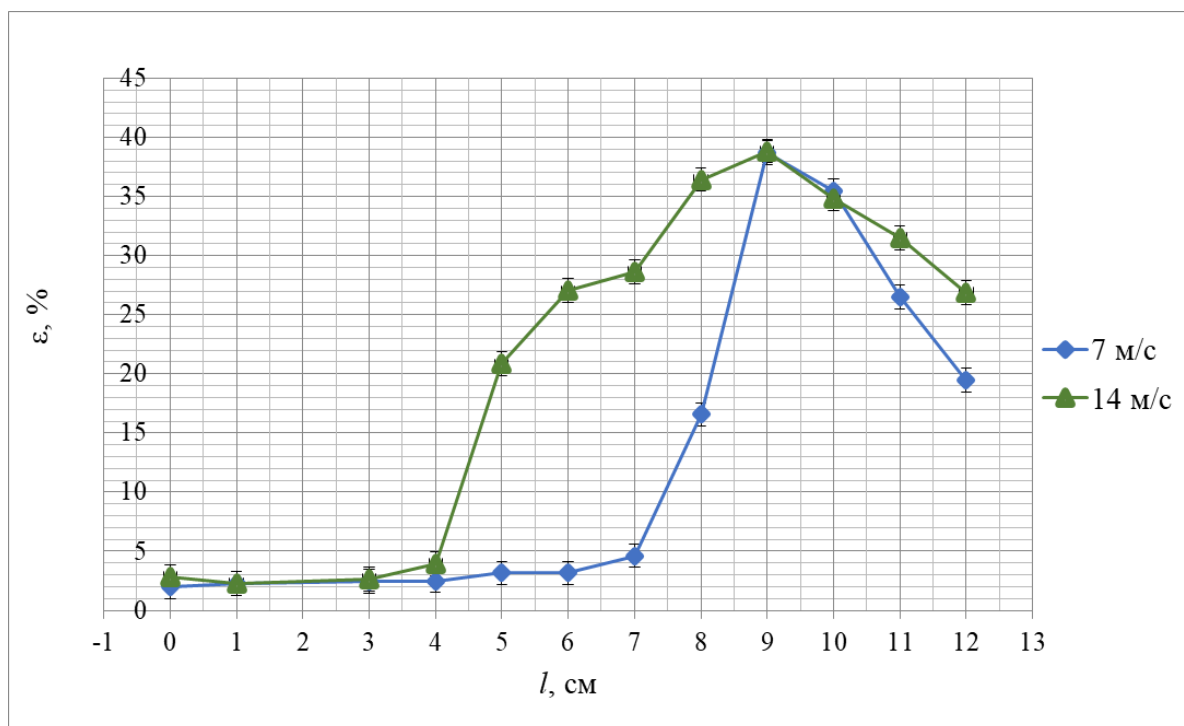


Рис. 3. График зависимости интенсивности турбулентности от координаты в рабочем сечении на срезе конфузора АДС 200/250

Выводы. Разработан упрощенный метод градуировки проволочного термоанемометра постоянной температуры (ТА ПТ), основанный на измерении выходного напряжения датчика в условиях отсутствия потока. Предложенный подход устраняет необходимость использования специализированных аэродинамических стендов, требующих независимого контроля скорости и температуры потока, что существенно снижает эксплуатационные затраты. Важной особенностью данного способа является возможность использования в датчике термоанемометра постоянной температуры только одной нити, что значительно повышает надежность автоматизированной измерительной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ярин, Л. П. Термоанемометрия газовых потоков / Л. П. Ярин, А. Л. Генкин, В. И. Кулес. – Л.: Машиностроение, 1983. – 198 с.
2. Пометун, Е. Д. Измерение интенсивности турбулентности по упрощенной методике градуировки проволочного датчика термоанемометра / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 47-51. – DOI 10.5281/zenodo.14514525. – EDN RIKOSA.
3. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PNCERN.
4. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 4-8. – EDN BAUIKR.
5. Основы информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Е. В. Колесник // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 64-74. – DOI 10.5281/zenodo.14018604. – EDN SDSQAP.

6. Лебедев, В. Н. Термокомпенсация выходного сигнала термоанемометра на основании уравнения теплового баланса / В. Н. Лебедев, Е. Д. Пометун, А. В. Васильева // Оригинальные исследования. – 2022. – Т. 12, № 5. – С. 406-412. – EDN OWAUUQ.
7. Пометун, Е. Д. Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2015. – № 1-2(8-9). – С. 88-91. – EDN XSASJB.
8. Пометун, Е. Д. Термоанемометрический метод измерения пульсаций скорости турбулентных потоков / Е. Д. Пометун // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 15-19. – EDN NBPFBG.

Поступила в редакцию 03.02.2025 г., рекомендована к печати 18.02.2025 г.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING TURBULENCE PARAMETERS

Pometun E.D., Lebedev V.N.

The article describes an automated system for measuring turbulence parameters in non-isothermal gas flows. The proposed measurement method reduces time and material costs by simplifying the calibration procedure for a thermal anemometer sensor. The main components of the automated system, signal processing methods, and algorithms for analyzing turbulent flows are described. Experimental test results confirming the effectiveness of the proposed solution are presented.

Keywords: turbulence, automated system, thermal anemometer, thermal compensation.

Пометун Екатерина Дмитриевна

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

Pometun Ekaterina Dmitrievna

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

Лебедев Владимир Николаевич

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

Lebedev Vladimir Nikolaevich

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ АНТЕННЫ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА БПЛА

© 2025 Дайуб А., Силкин А.А., Курушин А.А.

Приёмная навигационная антенна, которая принимает сигналы в диапазонах L1 и L2 глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС, имеет две полосы с крутым наклоном скатов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Антенна состоит из двух прямоугольных резонаторов, один из которых лежит между слоями диэлектрика (керамика Al_2O_3). Возбуждение верхней пластины выполняется перемычкой – штырём, продолжающим центральную жилу коаксиальной линии. Штырь проходит через отверстие в средней пластине, не касаясь её. Подбор геометрических параметров антенны выполнен в среде электродинамического моделирования CST SUITE. В работе представлены основные этапы синтеза структуры активной антенны и её настройки, включая потенциально достижимые характеристики, а также расчет зависимости характеристик при установке антенны на корпус беспилотного летательного аппарата БПЛА.

Ключевые слова: навигационная микрополосковая антенна, многослойная антенна, миниатюризация, беспилотный летательный аппарат БПЛА.

Введение. В настоящее время в мировой практике сформированы стандартные подходы и методы проектирования антенных модулей. В области проектирования навигационных антенн прослеживается тенденция к интеграции антенного элемента с фильтром и усилителем в единое устройство, которое называется активной навигационной антенной или навигационным антенным модулем.

Интерес к использованию печатных антенн (ПА) в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и т.д.) обусловлен их миниатюрностью и высокой технологичностью [1, 2].

В настоящее время происходит наращивание группировки спутников ГНСС, GALILEO и BEYDOU за счет ввода их в эксплуатацию, а также добавления новых частотных диапазонов уже существующих ГНСС. Поэтому возникает необходимость в создании многофункциональной аппаратуры потребителей, работающей одновременно с максимальным числом ГНСС в различных (в идеале во всех) диапазонах частот. Это обстоятельство влечёт за собой необходимость создания ПА с расширенным диапазоном рабочих частот, либо многодиапазонных микрополосковых антенн, КСВ которых должен выглядеть как на рис. 1.

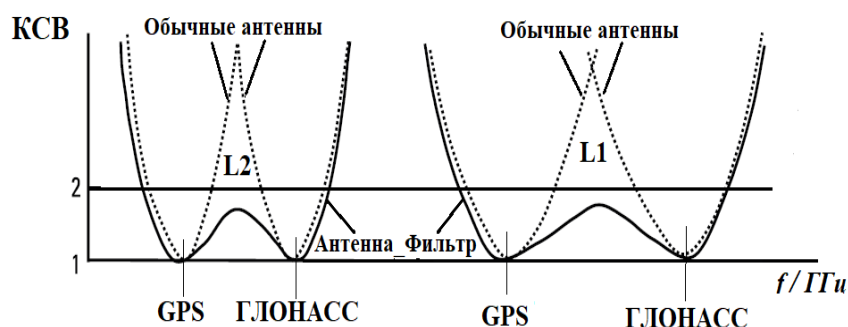


Рис. 1. Частотная характеристика КСВ ПА

Характеристики навигационной антенны, расположенной на БПЛА, зависят как от положения антенны, так и от окружающего корпуса и находящихся внутри корпуса проводящих объектов: аккумулятора, мотора, приемно-передающего модуля (рис. 2). Корпус, созданный из стеклокомпозита, изменяет характеристики антенной системы. Погодные условия также значительно влияют на проводимость поверхности БПЛА. Это влияет на полосу пропускания и скорость передачи данных каналов связи БПЛА с командным пунктом [3].

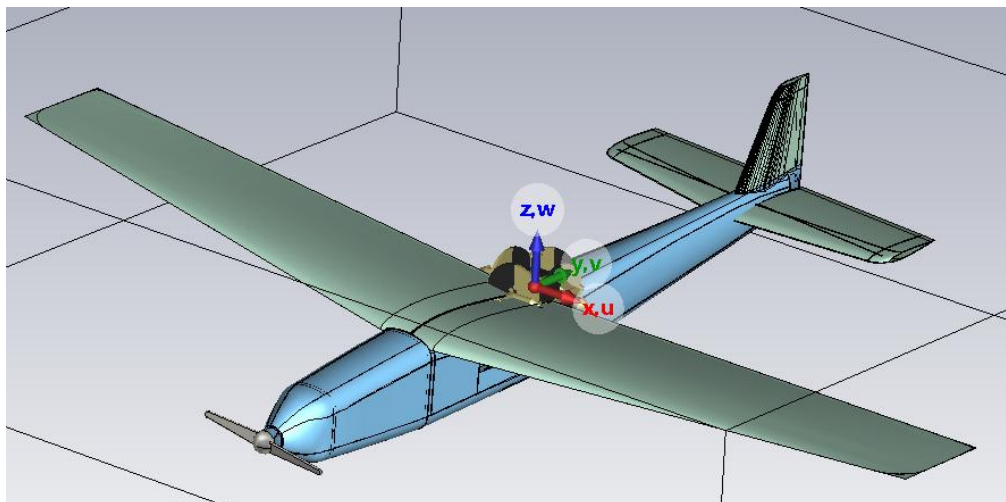


Рис. 2. Расположение навигационной антенны на корпусе БПЛА

Авторами работы [4] предложена оригинальная концепция конструирования навигационных антенных модулей, в соответствии с которой диэлектрическая подложка антенного элемента выполняется из керамики с антенным элементом наверху и металлизированным экраном внизу.

Для работы в расширенном диапазоне частот (с большим числом функционирующих сейчас ГНСС), авторами [5] предложена структура антенны, которая имеет два планарных сегмента, расположенных симметрично относительно центра микрополосковой антенны (рис. 3).

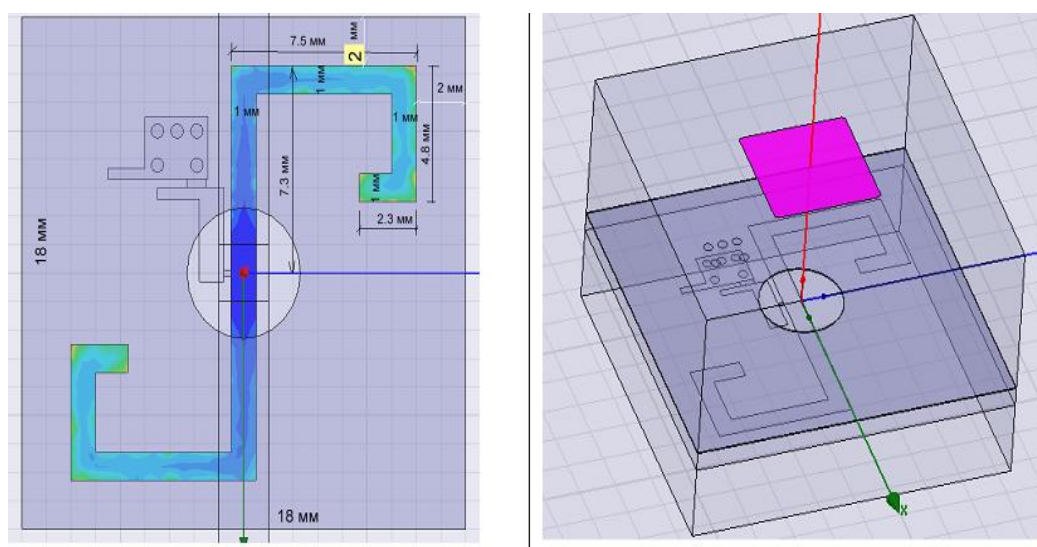


Рис. 3. Вид типичной антенны – фильтра на керамической подложке

Первый сегмент пач-антенны расположен сверху подложки, а второй – между верхним и нижним слоями подложки. Между сегментами существует распределенная взаимосвязь, которая позволяет добиться согласования антенны с питающим 50-омным трактом и сохранения формы диаграммы направленности в полосе частот L1 ГЛОНАСС/GPS. Такая антенна может быть спроектирована для работы в двух отдельных диапазонах, например L1 и L2 ГЛОНАСС/GP или L1 GPS и E5 GALILEO (рис. 1). На базе такого антенного элемента проектируется активный модуль с малошумящим усилителем, с фильтрами и защитой от перегрузки для работы в диапазонах частот L1 и L2 ГЛОНАСС/GPS, описанный в [6]. Этот антенный модуль может быть использован как встраиваемый элемент навигационного приемника ГЛОНАСС/GPS/GALILEO, а также в качестве базового элемента антенных решеток для навигационной аппаратуры с подавлением помех. Однако для проектирования антенного модуля, способного работать одновременно во всех без исключения рабочих диапазонах частот ГНСС ГЛОНАСС/GPS/GALILEO/BEIDOU, возможно применение более сложного антенного элемента, а именно микрополосковой антенны этажерочного типа [4, 6, 7]. В антеннах этажерочного типа антенные элементы разных диапазонов помещаются один над другим, таким образом, чтобы более высокочастотный антенный элемент устанавливался над низкочастотным антенным элементом. Каждый из нижних антенных элементов служит отражательной плоскостью для антенного элемента, расположенного над ним.

Термин «антенна-фильтр», который отражает объединение в антенне излучающих и фильтрующих свойств используется в работе [5] потому, что было отмечено два разных подхода при разделении излучающих и фильтрующих свойств сложных антенн. Анализ фильтра в схематическом представлении (рис. 4), действительно, разделяет эти задачи, а анализ структуры в электродинамическом представлении объединяет эти свойства. Особенно это заметно в антенне с круговой поляризацией, которая рассматривается в работе. Это либо однозвенный (рис. 4), либо двухзвенный (рис. 5) фильтр, поскольку при круговой поляризации возбуждаются перпендикулярные компоненты поля.

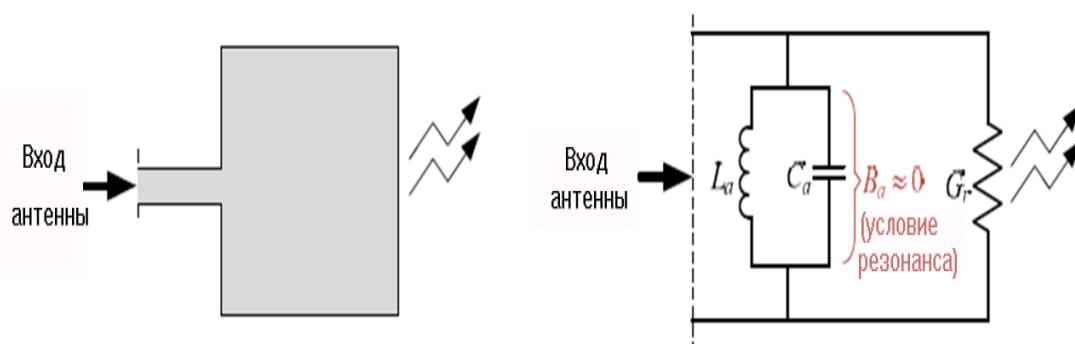


Рис. 4. Электродинамическая модель антенны, работающей на передачу

При моделировании двухполосовой антенны-фильтра выбираем двухслойную структуру этажерочного типа, включающую пач-антенны, работающие в двух диапазонах: L1 и L2 (рис. 1). В этом случае электродинамическая модель и её схемный эквивалент усложняются.

Расчёт параметров многослойной патч-антенны. Общая идея проектирования антенны с двумя полосами L1 и L2 состоит в том, что на каждый диапазон нужно иметь свою антенну, а основная сложность заключается во взаимной расположении этих антенн относительно друг друга. Известно, что размер ребра ПА, выполненной в виде полуволнового излучателя, приближённо определяется соотношением [1]:

$$L = \frac{c}{2 * f_r * \sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (1)$$

где c – скорость света, f_r – резонансная частота, ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость, причем

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

ГДЕ ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала, из которого выполнена ПА,

$$W = \frac{c}{2 * f_r} * \sqrt{\left(\frac{2}{\epsilon_r + 1}\right)}. \quad (3)$$

На частотах 1...2 ГГц ПА на подложках с малой диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2 \dots 3$, имеют размеры порядка 70-100 мм. Соотношения (1-3) показывают, что один из возможных путей миниатюризации ПА состоит в увеличении ϵ_r .

Конструкция рассматриваемой антенны этажерочного типа состоит из двух прямоугольных резонаторов (патчей) и двух диэлектрических слоёв, которые могут быть разными по высоте и по величине диэлектрической проницаемости (рис. 5).

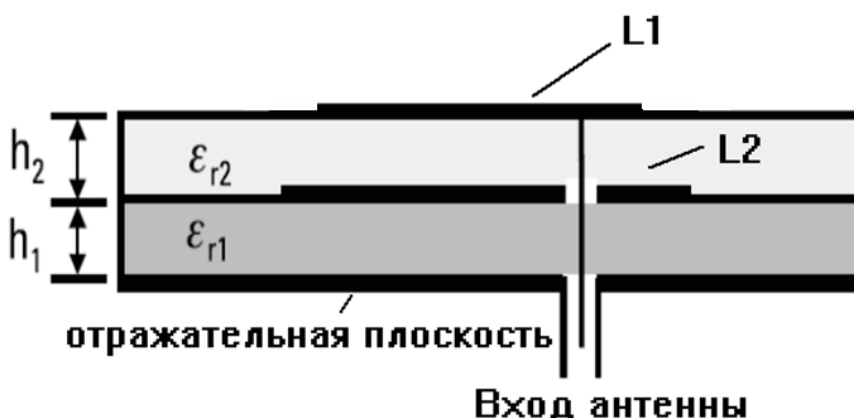


Рис. 5. Структура двухслойной антенны с электромагнитно-связанным возбуждением

Размеры патча должны быть оптимизированы таким образом, чтобы виртуальные резонансные частоты каждого из патчей были смещены относительно друг друга для получения двухгорбой частотной характеристики. Эквивалентная схема такой антенны приведена на рис. 6.

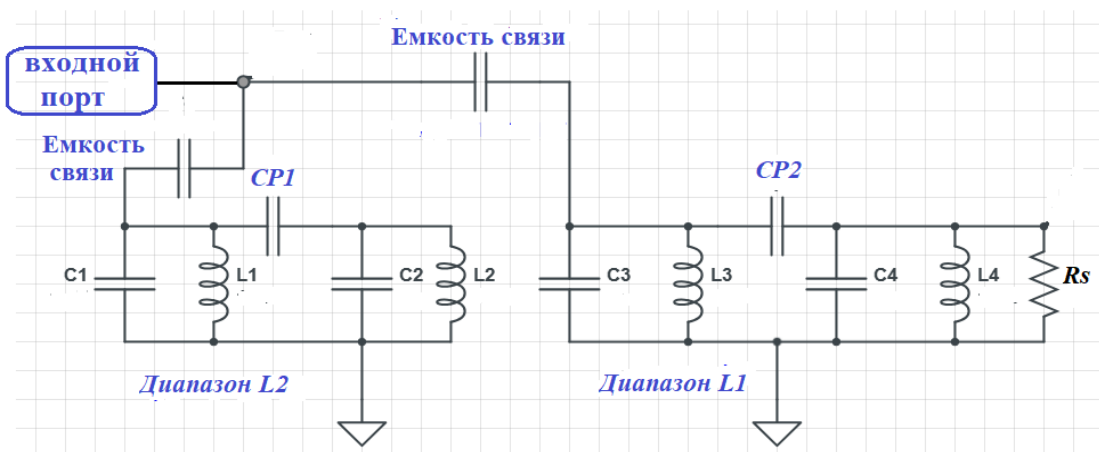


Рис. 6. Эквивалентная схема двухслойной пач-антенны с круговой поляризацией

Резонансные контуры $L1-C1$ и $L2-C2$ (рис. 6) формируют резонансные частоты пач-антенны диапазона $L2$, а резонансные контуры $L3-C3$ и $L4-C4$ формируют резонансные частоты в диапазоне $L1$. Подбором этих элементов можно получить частотную характеристику антенны (рис. 7), степень поляризации которой регулируется элементами связи $Cp1$ и $Cp2$.

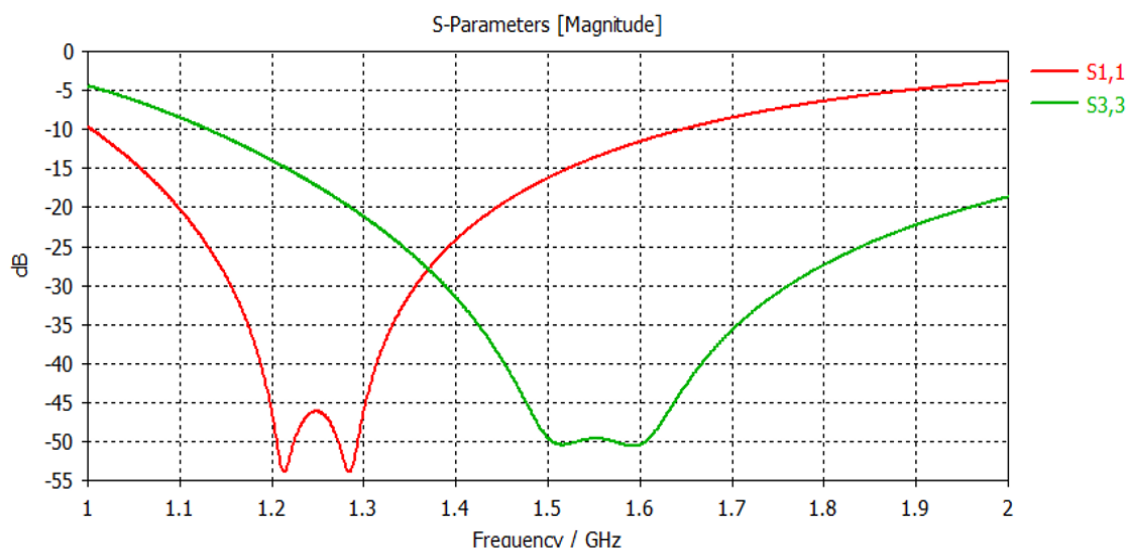


Рис. 7. Частотные характеристики эквивалентной схемы патч-антенны, приведенной на рис. 6.

Микрополосковые антенны можно возбуждать либо микрополосковой линией, либо коаксиальным кабелем. Их также можно возбудить косвенно, используя электромагнитную связь или апертурную связь или волноводный облучатель, в этом случае нет прямого металлического контакта между облучающей линией и патчем [8-11]. В нашем случае используется электромагнитная связь, так что один из патчей питается коаксиальной линией, а другой - за счёт электромагнитной связи. Возбуждение верхней пластины выполняется перемычкой – штырём, продолжающим центральную жилу коаксиальной линии. Штырь проходит через отверстие диаметром 2.5 мм в средней пластине, не касаясь её (рис. 5). Следовательно, средняя патч-антенна не связана напрямую с центральной жилой, а возбуждается электромагнитной связью, создаваемой жилой и отверстием в среднем патче.

Электродинамическое моделирование двухслойной навигационной антенны. Для моделирования и оптимизации двухслойной двухдиапазонной антенны-фильтра и исследования её свойств численными методами использовался пакет электродинамического моделирования CST SUITE. Как уже упоминалось выше, конструкция антенны состоит из двух прямоугольных резонаторов и двух диэлектрических слоёв. В ходе моделирования находятся размеры каждого патча $L_{\text{патч1}}$, $L_{\text{патч2}}$ и $W_{\text{патч1}}$, $W_{\text{патч2}}$, толщины первой и второй диэлектрических подложек h_1 и h_2 и их диэлектрические проницаемости ϵ_1 , ϵ_2 . Компьютерная модель антенны представлена на рис. 8.

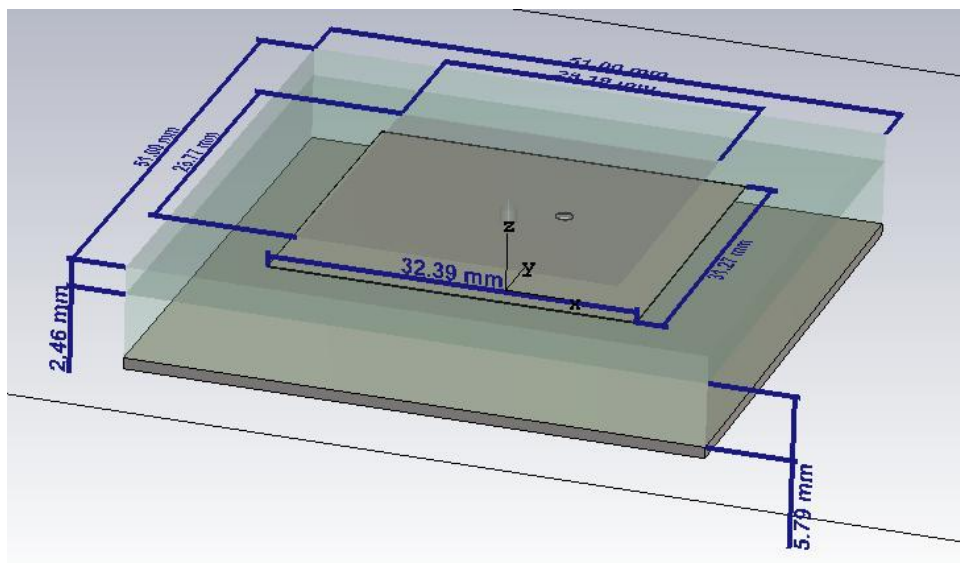


Рис.8. Структура двухслойной антенны

Для уменьшения размера ПА используется керамический материал с высокой добротностью и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1=\epsilon_2=9.8$ (керамика Al_2O_3) с толщиной $h_1=5$ мм, и $h_2=2.5$ мм. Возбуждение верхней пластины выполняется перемычкой – штырем; этот штырь проходит через отверстие в нижней пластине диаметром 1.6 мм, не касаясь её.

На первом этапе моделирования выбираем стороны верхней и средней пластин одинаковыми: $L_{\text{патч1}}=W_{\text{патч1}}=31.4$ мм, и $L_{\text{патч2}}=W_{\text{патч2}}=28$ мм. В результате первоначального расчета получаем частотную характеристику реальной и мнимой частей входного импеданса двухслойной двухдиапазонной патч-антенны, показанную на рис. 9.

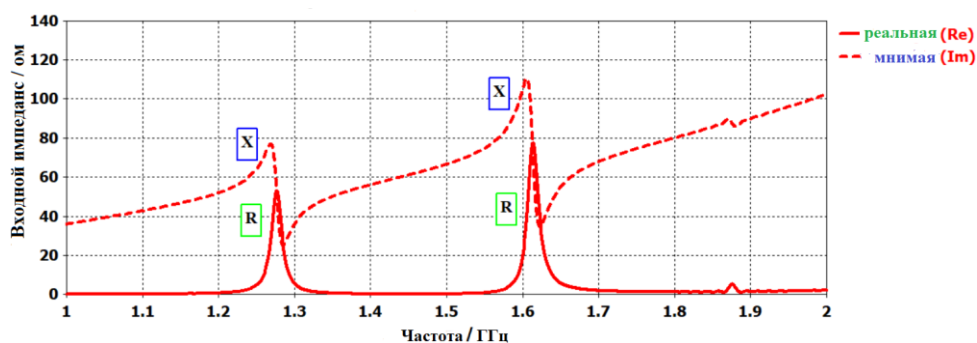


Рис. 9. Частотные зависимости реальной и мнимой частей входного импеданса антенны

Чтобы получить АЧХ антенны, удовлетворяющую требованиям рис. 1, сформулируем цель синтеза. Это можно сделать, задав значения $|S_{11}|$ в определенном диапазоне частот. Критерий получения минимума $|S_{11}|$ соответствует требованию достижения следующих реальной и мнимой части входного импеданса (рис. 9):

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{ex}}) = 50 \text{ [Ом]}, \operatorname{Im}(Z_{\text{ex}}) = 0, \quad (4)$$

поскольку связь между S_{11} и $Z_{\text{вх}}$ описывается известным выражением

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{ex}} - Z_0}{Z_{\text{ex}} + Z_0}, \quad (5)$$

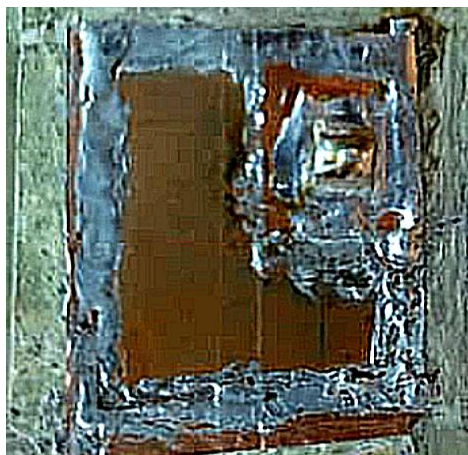
где Z_0 - волновое сопротивление линии питания.

Из расчета, показанного на рис. 9, можно сделать следующие выводы:

1. Входной импеданс многослойной двухполосовой патч-антенны имеет индуктивный характер.
2. Мнимая часть входного импеданса имеет нарастающий характер, и таким образом эквивалентная индуктивность в области второго резонанса, которая определяется размерами верхней пластины, имеет большую величину, чем эквивалентная индуктивность для средней пластины.
3. Активная часть входного импеданса увеличивается, при смещении точки питания верхней антенны, и чем дальше от центра находится точка питания, тем больше значение реальной части входного импеданса.
4. Резонансные частоты определяются размером ребрами патч-антенны, и изменяя этот размер, можно ввести значение частоты в диапазоны L1 и L2 для систем навигации.

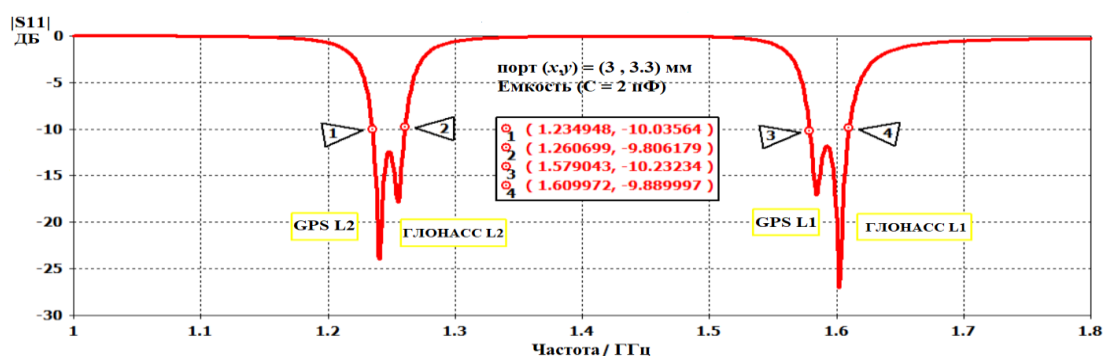
В процессе синтеза и оптимизации геометрии структуры антенны важно выявить, какие размеры влияют на определенные параметры и характеристики устройства. Будем изменять размеры средней патч-антенны, которая имеет большие размеры, чем верхняя антенна и изменяет частотную характеристику в диапазоне частот L2.

На следующем этапе будем подбирать координаты центра отверстия (X,Y), изменяя их с 3 мм до 3.6 мм для (X,Y) и величину ёмкости для согласования верхней антенны (рис. 10). Ёмкость используется для компенсации мнимой части входного импеданса антенны (если ёмкость одна, то она влияет и на L1 и на L2). Чтобы скомпенсировать мнимую часть входного импеданса на частотах L1 и L2 с разной степенью, нужно применять более сложную схему деления и внесения мнимой части входного импеданса с разделением на полосы частот. По результатам моделирования, а также эксперимента, оказалось, что самый лучший вариант будет при расположении центра отверстия со смещением относительно центра $(x,y) = (3.4\text{мм}, 3.4\text{мм})$ и последовательной ёмкости 2.0 пФ. В этом случае было получено раздвоение АЧХ в районе диапазона L2 шириной 22 МГц, меняя размеры антенны и расположение точки питания с добавлением дискретного последовательного элемента - емкости. Однако отметим, что полоса пропускания антенны в диапазоне L2, покрывает только систему ГЛОНАСС. Увеличение полосы рабочих частот антенны в диапазоне L2 для включения системы GPS выполняется с помощью оптимизации после корректировки габаритов верхней антенны, обеспечивающей наилучшую АЧХ в диапазоне L1. Численный расчет показал, что при изменении размеров верхней антенны $L_{\text{патч2}}$ и $W_{\text{патч2}}$ частотная характеристика приобретает раздвоение. При этом наилучший вариант достигается при $L_{\text{патч2}} = 28.78 \text{ мм}$ и $W_{\text{патч2}} = 28.33\text{мм}$, координатах порта $(x,y) = (3\text{мм}, 3.3\text{мм})$ и последовательной емкости 2.0 пФ, как показано на рис. 11.



- а) Верхний слой пач-антенны с вмонтированным на ней емкостью
- б) Средний слой пач-антенны (емкость зависит от соотношения между диаметром штыря и диаметром отверстия)

Рис. 10. Пач-антенна

Рис. 11. Частотная характеристика $|S_{11}|$ антенны-фильтр

На рис. 11 видно, что антенна работает в двух диапазонах частот, первая полоса с шириной: $\Delta f_{L2} = 26$ МГц от [1.235 до 1.26] МГц, а вторая полоса с шириной: $\Delta f_{L1} = 31$ МГц от [1.578 до 1.609] ГГц. Это означает, что антенна может принимать сигналы системы ГЛОНАСС в диапазонах L1 и L2.

Экспериментальные результаты исследования характеристик пач-антенны на корпусе БПЛА. Принципиальным отличием антенн, работающих на корпусе БПЛА среднего и малого размера, становится то, что земляная плата патч-антенн имеет небольшие размеры, часто искривленной формы. Программа CST SUITE позволяет решить задачу моделирования антенных систем, находящихся на сложных корпусах и состоящих из нескольких антенных систем (рис. 12). Метод решения, при размахе крыльев БПЛА до 3-х метров, может быть выбран как базовым методом конечных разностей во временной области, метод конечных элементов, а также метод интегральных уравнений. Для расчета крупногабаритных объектов перспективным можно считать асимптотический метод физической оптики, который рассчитывает распространением. Задача, которая была решена в рамках анализа характеристик планарной антенны с круговой поляризацией на корпусе сложной формы, показал, что ограничение полосы пропускания системы определяется в первую очередь степенью круговой поляризации (величиной такой характеристики, как осевой отношение).

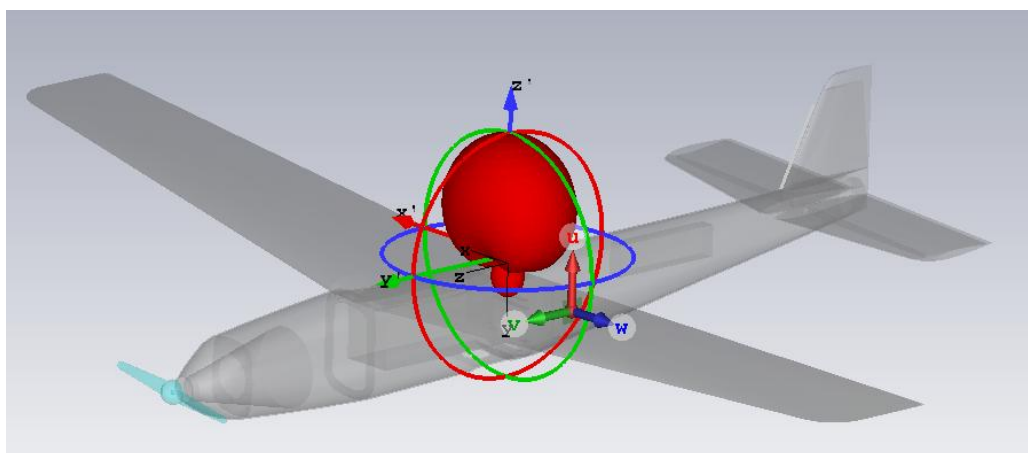


Рис. 12. Планарная двухслойная антенна, установленная на корпусе БПЛА в виде модели источника дальнего поля

Запущенные геометрические лучи, возбужденные антенной, представляют собой расходящиеся объемно-лучевые трубки, которые "окрашивают" токи на поверхности платформы в соответствии с граничными условиями. Эти токи в свою очередь излучают поля в дальнюю зону, а также формируют ближнее поле в точках наблюдения, или воздействуют на антенну R_x для создания вклада поля рассеяния. Далее из точек, в которых лучи падают на поверхности, формируется набор отраженных лучей (рис. 13).

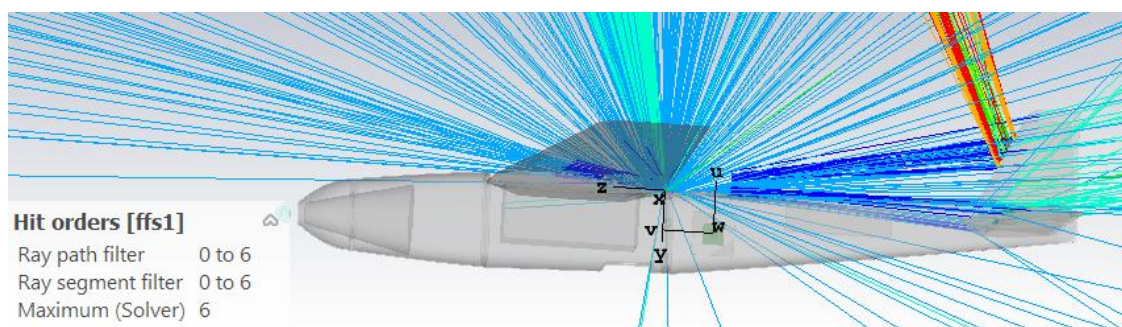


Рис. 13. Распространение лучей в среде БПЛА от навигационной антенны, стоящий на верхней плоскости самолета

Алгоритм SBR (Shooting and Bouncing Rays) интегрирует возбуждение токов от всех прочерченных лучей на основании выражения [12]:

$$\bar{E}_S(\bar{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S'} dS' \left[\left(\hat{n} \cdot \bar{E} \right) \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} + \left(\hat{n} \times \bar{E} \right) \times \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} - j\omega\mu \left(\hat{n} \times \bar{H} \right) \frac{e^{-jkR}}{R} \right], \quad (6)$$

где $\bar{E}_S$ - рассеянное электрическое поле в точке наблюдения, S' - область действия лучей в точках падения на поверхность, $\bar{E}$ и $\bar{H}$ - суммарные электрические и магнитные поля на поверхности при воздействии падающего и отраженного лучей, $\hat{n}$ - нормаль к поверхности, $\hat{r}$ - положение вектора направления луча к точке наблюдения, R - расстояние от источника до точки наблюдения, а μ_0 - магнитная проницаемость в свободном пространстве. Выражение (6) используется в программе Savant для вычисления вклада рассеянного поля в любой точке наблюдения.

Частотные характеристики зависимости осевого отношения AR, полученные на рис. 14, согласуются с тем фактом, что в системах с круговой поляризацией рабочий диапазон частот ограничивается частотной зависимостью AR [4, 6].

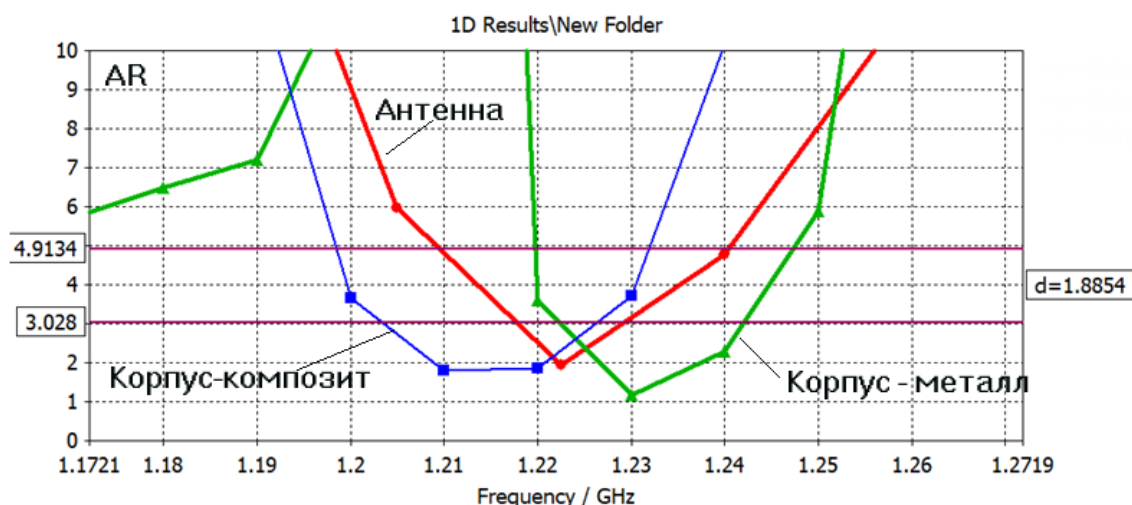


Рис. 14. Рассчитанные асимптотическим методом характеристики осевого отношения AR в диапазоне частот и в зависимости от состояния покрытия корпуса БПЛА

Экспериментальные исследования антенны были проведены в учебной безэховой камере в реальных условиях, и показывали качественную близость с рассчитанной характеристикой коэффициента отражения (рис. 11). Стремление к повышению точности моделирования стимулирует поиск одновременно более строгих и в тоже время достаточно простых методов, позволяющих рассчитывать эквивалентные схемы, содержащие реактивные элементы. Здесь уместно вспомнить метод Олинера, который длительное время был едва ли не единственным приемлемым средством для компьютерного анализа полосковых структур. К числу подобных объектов следует также отнести многослойные антенны, установленные на корпусе БПЛА, обеспечивающие передачу/прием электромагнитных волн.

Заключение. В работе описана методика проектирования двухдиапазонной антенны для приёма сигналов ГЛОНАСС и GPS. Антенна этажерочного типа создана в виде многослойной конструкции ПА, где верхний слой отвечает за приём сигналов на более высоких частотах, а нижний - на более низких. Основная сложность заключалась в правильном подборе размеров антенн и точки питания, обеспечивающих требуемую частотную характеристику. При этом, верхняя антенна возбуждается стандартно штырём, а для возбуждения нижней антенны применяется электромагнитная связь в щели, которая описывается эквивалентной схемой. Показано, как асимптотические методы расчета характеристик дальнего поля используются для расчета антенных систем, установленных на корпусе БПЛА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Панченко Б. А. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефедов. – М.: Радио и связь, 1986. – 145 с.
2. Compact and Broadband Microstrip Antennas / K. L. Wong. – NY: John Wiley&Sons, 2002. – 324 p.
3. Dual band proximity-feed patch antenna for tree-band GPS applications / Y. Zhou, C. C. Chen, J. L. Volakis // IEEE Transactions on AP. – 2007. – V. 55. – № 1. – P. 220-223.
4. Миниатюризация антенных модулей навигационной аппаратуры спутниковых навигационных систем / С. Н. Бойко, С. В. Косякин, А. С. Кухаренко, Ю. С. Яскин // Антенны. – 2013. – № 12. – С. 38-44.

5. Банков, С. Е. Антенна-фильтр / С. Е. Банков, А. Г. Давыдов, А. А. Курушин // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №4. – 37 с.
6. Авдонин, В. Ю. Двухдиапазонная активная микрополосковая антенна круговой поляризации / В. Ю. Авдонин, С. Н. Бойко, А. В. Исаев // Антенны. – 2012. – № 8. – С. 38-45.
7. Quad-band probe-feed stacked annular patch antenna for GNSS application / J. Li, H. Shi, H. Li, A. Zhang // IEEE Antennas and Wireless Propagation. – 2014. – V. 13. – P. 372-375.
8. Handbook of Microstrip Antennas / J. R. James, P. S. Hall. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1989. – 1312 p.
9. Advances in Microstrip and Printed Antennas / H. F. Lee, W. Chen. – New York: John Wiley & Sons, 1997. – 624 p.
10. CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications / R. A. Sainati. – Norwood, MA: Artech House, 1996. – 255 p.
11. Increasing the Bandwidth of a Microstrip Antenna by Proximity Coupling / D. M. Pozar, B. Kaufman // Electronics Letters. – V. 23. – № 8. – 1987. – P. 368–369.
12. Antenna Theory (third edition) / C. A. Balanis. – NY: John Wiley & Sons, 2005. – 1050 p.

Поступила в редакцию 05.02.2025 г., рекомендована к печати 20.02.2025 г.

MODELING CIRCULARLY POLARIZED NAVIGATION ANTENNA ON AERIAL VEHICLE

Dayoub A., Silkin A.A., Kurushin A.A.

Navigation antenna in the L1 and L2 bands of global navigation satellite systems (GPS, GLONASS), has two bands with steeply inclined slopes of frequency response. The antenna consists of two rectangular resonators, one of which lies between the dielectric layers (ceramic Al₂O₃). The excitation on upper plate is performed by central wire of the coaxial line passed through hole in the middle plate antenna. Synthesis structure antenna, as well as calculating the dependence of characteristics the antenna on the body of an unmanned aerial vehicle (UAV) was performed using the CST program.

Keywords: antenna-filter, CST SUITE, multi-layer antenna, planar patch antenna, GPS, GLONASS navigation systems, dual-band antenna L1, L2, unmanned aerial vehicle (UAV).

Дайуб Али

аспирант, ассистент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: DaiubA@mpei.ru

Dayoub Ali

Postgraduate Student, Assistant at Department of Radio Technical Devices and Antenna Systems at the Moscow Power Institute,
Russian Federation, Moscow.

Силкин Артем Анатольевич

кандидат технических наук, главный конструктор Научно-производственного конструкторского центра «Новик-91»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: silkin-a-a@yandex.ru

Silkin Artem Anatolevich

Candidate of Technical Sciences, Chief of Scientific Design Center «Novik-91»,
Russian Federation, Moscow.

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN DNTSOL
УДК 621.314.15

DOI 10.5281/zenodo.15056677

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА С МНОГОКАНАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЧАСТОТОЙ

© 2025 Сасов А.М.

В статье обозначена область применения преобразователей постоянного тока в источники переменного тока. Приведен анализ промышленных инверторов, на базе полупроводниковой элементной базы, для подключения трехфазных потребителей к источникам постоянного тока. Выявлены их недостатки для случаев использования в мобильных средствах передвижения. Рассмотрены особенности конструкции генераторов импульсов, с многоканальным управлением частотой генерируемых импульсов, использующих волоконно-оптические элементы. Предложены схема и описание принципа работы преобразователя постоянного тока в трехфазный источник тока, с четырехканальным управлением частотой, с использованием оптопар.

Ключевые слова: инвертор, фоторезистор, светодиод, оптопара, тиристор, микросхема.

Введение. Источником и хранилищем энергии автоматизированных средств передвижения, как правило, служат аккумуляторы. Непосредственно, выдаваемый ими постоянный ток, используется весьма ограничено. В основном он подвергается многочисленным преобразованиям во вторичных источниках питания. Естественно, что требования к электропитанию бортовой радиоэлектроники и силового оборудования, существенно отличаются. Своя специфика и у электроприводов вспомогательных систем управления механизмами автоматизированных устройств. Например, применяемым в этих системах синхронным электродвигателям требуется трехфазный ток.

Эти двигатели характеризуют способность сохранять стабильность частоты вращения ротора при изменении величины механических нагрузок на валу. Они сохраняют нагрузочную способность при скачках и асимметрии напряжения в сети питания. Как правило, двигатели для систем управления используют небольшой мощностью. Следовательно, потерями на качестве формы синусоиды, можно пренебречь. Ротор синхронной электрической машины вращается с такой же угловой скоростью, что и магнитное поле статора. Поэтому управление скоростью вращения ротора электродвигателя осуществляют путем изменения частоты питающего его электрического тока.

В бортовых устройствах, основными источниками переменного тока, служили умформеры - однокорные электромашинные преобразователи постоянного тока в переменный ток [1]. К их недостаткам следует отнести наличие щеточно-коллекторного узла, низкий КПД, большую материалоемкость конструкции, вибрации и шумы, небольшой рабочий ресурс, необходимость технического обслуживания. Кроме этого, частота вырабатываемого тока фиксирована, 50 Гц или 400 Гц. По мере развития прецизионных технологий, умформеры стали вытесняться блоками электропитания на основе полупроводниковой элементной базы [2].

Преобразователи постоянного тока в переменный ток электронного типа – инверторы, дают возможность регулировать в широком диапазоне скорость вращения ротора синхронных машин. На базе полупроводниковой элементной базы разработано множество вариантов подключения их к источникам постоянного тока. Кроме этого, инверторы являются неотъемлемой частью устройств генерации электрического тока, посредством солнечных батарей. На Российском рынке, интерес представляют солнечные инверторы SILA PRO 10000MH и SOFAR 15000KTLX-G3, преобразующие постоянный ток от солнечных батарей, в трехфазный 380 В, 50 Гц [3].

Отечественной промышленностью выпускается автомобильный инвертор Союз PI-4000 24 В, преобразующий постоянный ток 12 или 24 В в переменный ток 220 В, 50 Гц [4]. Специально, для систем связи, были разработаны инверторы серии «Штиль» - PS220/700C-P-2 1U, обеспечивающие преобразование напряжения 12, 24, 48 или 110 В постоянного тока в напряжение 220 В переменного тока, 50 Гц [5]. Для питания пилотажно-навигационной аппаратуры бортовых авиационных систем, выпускается инвертор марки ПТС-800БМ, преобразующий постоянный ток напряжением 27 В, в переменный трехфазный ток, напряжением 115 В с частотой 400 Гц [6].

Серийно выпускаемые преобразователи серии ИС2 (инверторы синусоидальные), предназначены для преобразования постоянного тока от аккумуляторов, с номинальным значением напряжения от 12 В до 110 В, в переменное синусоидальное напряжение 220 В, частотой 50 Гц [7]. Обзор теоретических вариантов построения инверторов и преобразователей частоты, их особенности и принципы работы, приведен в работе М. В. Гельмана с коллегами [8]. Для всех преобразователей характерно то, что частота выходного тока у них фиксирована или управление частотой осуществляется одним источником команд. Поэтому, управлять исполнительными механизмами, получающими питание от таких преобразователей, может только один оператор, или сигнал только от одного датчика.

Постановка задачи. В автоматических системах, оснащенных несколькими датчиками информации, типичны ситуации, при которых исполнительный механизм должен быстро изменять режим работы всего устройства, т. е. отрабатывать команду. Вместо датчиков могут быть несколько операторов, управляющих каким-либо одним процессом. Сигналы от каждого датчика (оператора), предварительно форматируют. Затем, общий массив информации обрабатывают.

На основе полученных результатов вырабатывают команду, на изменение режима работы электропривода, управляющего механизма. И только после этого, включается в работу исполнительный основной механизм. Таким образом, затраты времени на обработку информации и подготовку команды для управляющего механизма, негативно влияют на быстроту выполнения команды исполнительным механизмом.

Задача работы заключается в том, чтобы разработать, такой преобразователь постоянного тока в трехфазный переменный источник тока, который мог бы обеспечить управление частотой выходного тока, одновременно, несколькими операторами, или потоком данных, получаемых синхронно, от нескольких датчиков, повышая при этом быстроту выполнения команды исполнительным механизмом.

Основная часть. Такой преобразователь, в принципе, может состоять из двух блоков – задающего генератора, с многоканальным управлением частотой, и преобразователя однофазного источника импульсов в трехфазный источник тока. Известен генератор, частота генерируемых импульсов которого, управляется одновременно по двум каналам [9]. Его принципиальная схема приведена на рис. 1а. Генератор может быть собран с применением микросхемы состоящей из четырех логических элементов И-НЕ: 1, 2, 3, 4.

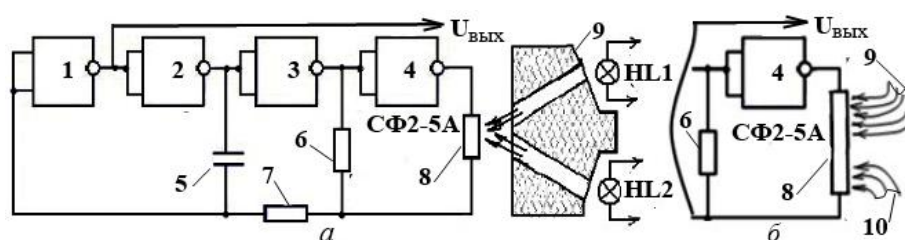


Рис. 1. Схема управляемого генератора импульсов:
а) с коллиматором; б) с волоконно-оптическим коллектором

В этом генераторе, элементом управления частотой, служит фоторезистор 8 марки СФ2-5А. Засвечивается он, двумя сверхминиатюрными лампами накаливания HL1 и HL2, марки СМН-6-20-1, размещенными в двухканальном коллиматоре 9. Фоторезистор входит в состав время задающей RC-цепи, включающей резисторы 6, 7 и конденсатор С. Управление частотой импульсов в выбранном диапазоне производится излучателем HL1. Посредством излучателя света HL2 выполняется выбор рабочего участка диапазона частот.

С помощью коллиматора осуществляется оптическая развязка двух источников света. Изменение тока питания любой из ламп, вызывает изменение суммарного светового потока падающего на фоторезистор. Это, в свою очередь, приводит к изменению сопротивления фоторезистора. В результате, меняются параметры RC-цепи, и, соответственно, частота генерируемых импульсов. Так реализуется одновременное, дистанционное управление частотой генерируемых импульсов двумя, гальванически развязанными, независимыми друг от друга, управляющими объектами.

В случаях, когда управляющих объектов более двух, можно использовать многоканальный вариант управления режимом работы генератора [10]. В этом варианте, вместо двухканального коллиматора, применяют волоконно-оптический коллектор, представляющий собой волоконно-оптический жгут (рис. 1б), который имеет регулярную укладку волоконных световодов. Диаметр оболочки световода – 25 мкм, их используют для изготовления гастроскопов [11]. Входной торец устанавливают на окне фоторезистора СФ2-5А. Его фоточувствительный элемент имеет прямоугольную форму с размерами 1мм×5,8мм. Практически, на этой поверхности можно поместить входной торец в виде матрицы, состоящей из 6000 световодов.

Такое количество световодов позволяет сформировать большое количество выходных гибких жгутов. Часть из них, отводится под требуемое количество каналов управления частотой генерируемых импульсов. Многочисленность каналов управления требует большего разрешения команд. Поэтому выделяется несколько жгутов, посредством которых можно ограничивать диапазон рабочих частот, обеспечив растяжку диапазона. В результате повышается точность управления режимом работы генератора.

В качестве примера, в данной статье рассматривается преобразователь постоянного тока в трехфазный источник тока, с управляемым генератором импульсов, в котором время задающим элементом RC-цепочки служат оптопары [12]. Принципиальная схема преобразователя приведена на рис. 2. Анализ работы преобразователя (рис. 2) выполнен для самой распространенной рабочей частоте – 50 Гц. На этой частоте, период генерируемых импульсов равен 20 мс. Фазы тока, в типовой трехфазной электросети, сдвинуты относительно друг друга на 120°, т.е. на 1/3 периода, что составляет задержку по времени между ними на 6,666 мс. Генератор преобразователя работает следующим образом.

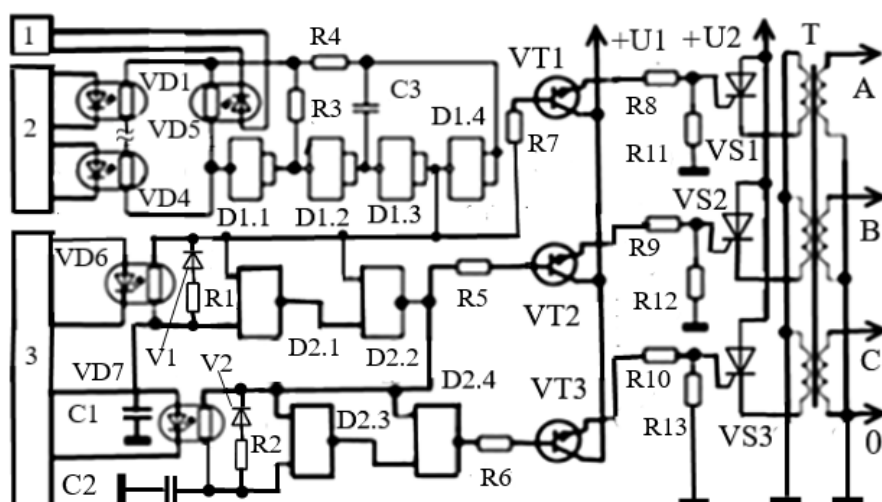


Рис. 2. Электрическая схема преобразователя постоянного тока в трехфазный источник тока с многоканальным управлением частотой

Перезаряд конденсатора $C3$ изменяет потенциал на входе инвертора $D1.4$, который при достижении порога срабатывания переключается. Это вызывает смену состояний инверторов $D1.1$, $D1.2$, $D1.3$ и очередной перезаряд конденсатора $C3$, в результате возникает режим генерации. Частота генерации определяется параметрами RC-цепи, состоящей из конденсатора $C3$, резисторов $R1$, $R2$ и омического сопротивления фоторезисторов оптопар $VD1 - VD5$.

Оптопары $VD1 - VD4$ служат каналами управления 2 частотой генерируемых импульсов, рис. 2. Выходное световое сопротивление фоторезистора одной оптопары марки АОР124Б, равно 360 Ом, выходное темновое сопротивление - 3 Мом. Суммарное выходное световое сопротивление, например, четырех последовательно соединенных фоторезисторов оптопар $VD1 - VD4$, при номинальном токе засветки, равно 0,0014 Мом, выходное темновое сопротивление - 12 Мом. Следовательно, сопротивление RC-цепи, можно в принципе, было бы регулировать в интервале от 1,4 кОм до 12 мОм.

Однако, вследствие того, что каждый фоторезистор способен менять свое сопротивление в большом диапазоне, результирующее сопротивление RC-цепи, также будет соответственно, меняться в разы, что приведет к резким изменениям генерируемых импульсов. Чтобы этого не происходило, параллельно к цепочке последовательно соединенных фоторезисторов оптопар $VD1 - VD4$, подсоединен фоторезистор оптопары $VD5$, канал растяжки диапазона 1 (рис. 2).

Результирующее выходное световое сопротивление цепи фоторезисторов $VD1 - VD5$, при их номинальной засветке, составляет 0,000286 МОм. Результирующее выходное темновое сопротивление, этих фоторезисторов - 2,4 МОм. Шунтирующее действие фоторезистора оптопары $VD5$ проявляется в том, что ограничивает диапазон рабочих частот генератора. При этом, происходит растяжка диапазона. Это способствует минимизации возникновения резких скачков частоты, следовательно, создает более комфортные условия работы мехатронных устройств.

Преобразование однофазного источника импульсов в трехфазный источник тока. С выхода генератора, импульсы подаются на вход схемы задержки и согласующего устройства $VT1$, которое управляет тиристором $VS1$ (рис. 2). В качестве его нагрузки служит первая секция первичной обмотки трехфазного трансформатора T . Так, в соответствующей секции вторичной обмотки трансформатора, формируется первая фаза – А [13].

Согласующее устройство VT2, фазы В, подключено к выходу генератора посредством схемы задержки, которая включает в себя логические элементы D2.1, D2.2, конденсатор C1, оптопару VD6, диод V1 и резистор R1. Импульс положительной полярности, с выхода D1.3, поступает на последовательную цепь V1 – R1 и фоторезистор оптопары VD6. Диод V1, относительно входного импульса, включен в обратном направлении. Поэтому ток заряда конденсатора протекает только через фоторезистор VD6. При достижении на входе инвертора D2.1 напряжения порогового уровня - 1,5 В, происходит его срабатывание, соответственно, срабатывает и инвертор D2.2. При этом, передний фронт импульса на выходе D2.2, относительно переднего фронта импульса на входе D2.1, задерживается на время, равное времени заряда конденсатора – 6,666 мс, что соответствует сдвигу между фазами А и В 120°.

Так как постоянная времени RC-цепи равна длительности импульса, время разряда конденсатора больше времени его заряда. Чтобы сохранить скважность генерируемых импульсов, равную двум, необходимо, возвращать схему в исходное состояние сразу, с окончанием импульса на входе. Для этого параллельно фоторезистору включена последовательная цепь V1 – R1. Разряд конденсатора в этом случае происходит через диод и ограничительный резистор. Таким образом, происходит сдвиг фазы В, относительно фазы А, на 120°.

Сдвиг фазы С, относительно фазы В, осуществляется схемой, идентичной схеме, рассмотренной выше. Коррекция интервала времени сдвига фаз, выполняется посредством управления током светодиодов оптопар VD6, VD7, каналов управления 3. Нагрузкой тиристоров VS1, VS2 и VS3 служат соответствующие секции первичной обмотки трансформатора Т. С выходных обмоток этого трансформатора снимается трехфазное напряжение частотой 50 Гц. Синхронные двигатели систем управления в автоматизированном оборудовании, как правило, обладают небольшой мощностью. Поэтому с незначительными потерями на высшие гармоники, вполне можно смириться.

Рекомендуемая элементная база. Для сборки преобразователя постоянного тока в трехфазный источник тока частотой 50 Гц, с многоканальным управлением частотой, можно использовать общедоступные комплектующие изделия:

- микросхемы D1 – K155ЛА3; D2 – K561ЛП2;
- VT1 – VT3 транзисторы KT315Б;
- тиристоры VS1, VS2, VS3 – серии КУ202, в зависимости от выходной нагрузки;
- VD1 - VD7 оптопары АОР124Б;
- конденсаторы C1, C2 – 0,01 мк; C3 – 5,0 мк;
- резисторы R3 – 1,5 кОм; R4 – 10 кОм; R6, R7, R8 – 20 кОм; R9, R10, R11 – 40 Ом; R9, R10, R11 – 1,0 кОм.
- трансформатор Т – подбирается в соответствии с выходной нагрузкой и диапазоном рабочих частот.

Простота предложенной схемы преобразователя постоянного тока в трехфазный источник тока, с многоканальным управлением частотой, позволяет использовать для его изготовления широкодоступные комплектующие элементы, несложна в настройке.

Заключение. В работе обоснована необходимость создания преобразователя постоянного тока в трехфазный источник тока, с многоканальным управлением частотой, для использования в автоматизированных средствах передвижения. Предлагаемая схема преобразователя позволяет осуществить управление одним исполнительным механизмом, одновременно, несколькими управляющими объектами или синхронно сигналами от нескольких датчиков.

Гальваническая развязка каналов управления, обеспечивает полную автономию управляющих объектов. Возможность производить растяжку выбранного диапазона рабочих частот, способствует повышению плавности движения в мехатронных конструкциях.

Рассмотренные варианты управляемых генераторов импульсов с многоканальной системой управления частотой генерируемых импульсов, могут найти применение при разработке различного автоматизированного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маковский, А. Л. Силовые преобразователи электрической энергии в технических системах управления: учебное пособие. / Маковский А. Л. – Минск: БГУИР, 2017. – С. 219-224.
2. Гельман, М. В. Вентильные преобразователи постоянного и переменного тока: учебное пособие / М.В. Гельман, М. М. Дудкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 127 – 132.
3. Сетевой солнечный инвертор SOFAR 15000KTLX-G3 [Электронный ресурс]. – URL: <https://sv-synergy.ru/magazin/product/setevoj-solnechnyj-invertor-sofar-15000tl-g2> (дата обращения: 03.12.2024).
4. Преобразователь постоянного тока СОЮЗ PI-4000 24В [Электронный ресурс]. – URL: <https://avtoshtorm.ru/shop/product/invertor-soyuz-pi-4000-24v> (дата обращения: 03.12.2024).
5. Инвертор для системной связи PS220/700C-P-2 1U [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.l-techno-k.ru/invertors/invertor-shtyl/inverter-ps-220-700c-p-2> (дата обращения 03.12.2024).
6. Преобразователь трёхфазный статический ПТС-800БМ [Электронный ресурс]. – URL: <https://nrmavia.ru/tth/preobrazovateli.php> (дата обращения 03.12.2024).
7. Преобразователь напряжения – инвертор: ИС2-12-300; ИС2-110-300. Руководство по эксплуатации. ТУ 3415-003-86803794-2012. Сибконтакт. – Новосибирск, 2012. – 4 с.
8. Гельман, М. В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 226-237, 304-318.
9. Патент 4892554/09 РФ. Управляемый генератор импульсов / А. М. Сасов. Оpubл. 27.12.96, Бюл. № 36.
10. Патент 2715547 РФ. Управляемый генератор импульсов / А. М. Сасов. Оpubл. 28.02.2020, Бюл. № 7.
11. Волоконная оптика и приборостроение / М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Оробинский, Б. П. Пал; под ред. М. М. Бутусова. – Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1987. – С. 19–21.
12. Сасов, А. М. Генераторы импульсов для многоканальных систем управления / А. М. Сасов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 470–472.
13. Ильин, А. Г. Подключение трехфазных потребителей к однофазной сети / А. Г. Ильин // Радиолюбитель. – 1998. – № 10. – С. 26–27.

Поступила в редакцию 16.12.2024 г., рекомендована к печати 13.01.2025 г.

DC CONVERTER TO THREE-PHASE CURRENT SOURCE WITH MULTI-CHANNEL FREQUENCY CONTROL

Sasov A.M.

The article outlines the scope of application of DC converters to AC sources. An analysis of industrial inverters based on semiconductor elements for connecting three-phase consumers to direct current sources is presented. Their shortcomings for use in mobile vehicles have been identified. The design features of pulse generators with multi-channel control of the frequency of generated pulses using fiber-optic elements are considered. A diagram and description of the operating principle of a DC-DC converter into a three-phase current source, with four-channel frequency control, using optocouplers are proposed. Galvanic isolation of channels for controlling the frequency of generated pulses ensures complete autonomy of control objects.

Keywords: inverter, photoresistor, LED, optocoupler, thyristor, microcircuit.

Сасов Анатолий Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Университет «Дубна» (Филиал «Протвино»),
Российская Федерация, МО, г. Протвино,
E-mail: amsasov@mail.ru

Sasov Anatolii Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes and Production of University «Dubna» (Branch «Protvino»),
Russian Federation, Moscow Region, Protvino.

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ РАСТЕНИЙ В ПРИРОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2025 Солоха П.М., Нестругина Е.С.

В настоящей статье рассмотрены и проанализированы различные модели обнаружения и распознавания растений с использованием сверточных нейронных сетей для идентификации различных видов растений в естественных условиях. Показаны преимущества применения искусственного интеллекта в данной области. Рассмотрены существующие архитектуры сверточных нейронных сетей, используемых для классификации изображений, дана их сравнительная характеристика, выявлены их преимущества и недостатки. Приведены примеры обучения модели на архитектурах VGG16 и ResNet50. Выбрана оптимальная архитектура сверточной нейронной сети для решения задачи распознавания растений.

Ключевые слова: компьютерное зрение, глубокое машинное обучение, обнаружение и распознавание растений, сверточные нейронные сети, обучение модели.

Введение. В последние десятилетия активное развитие технологий машинного обучения и компьютерного зрения открыло широкие перспективы и создало обширные возможности для их применения в различных сферах, включая биологию и экосистемы. Одной из актуальных задач является разработка интеллектуальных систем для автоматического распознавания растений в природных условиях. Это направление особенно важно для мониторинга биоразнообразия, экологических исследований, а также для улучшения процесса идентификации редких или исчезающих видов растений.

Традиционные методы классификации растений, основанные на экспертных знаниях и ручной идентификации, требуют значительных временных и людских ресурсов, что ограничивает их масштабируемость и эффективность. В связи с этим использование сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks, CNN), продемонстрировавших высокие результаты в задачах распознавания образов, является перспективным решением для автоматизации данного процесса. CNN способны анализировать визуальные данные, извлекая ключевые признаки изображений, что позволяет добиться высокой точности распознавания растений в сложных природных условиях, где может присутствовать множество факторов, влияющих на качество изображений, таких как освещение, фон и наличие других объектов [1-3].

В данной статье рассматривается использование сверточных нейронных сетей для распознавания различных видов растений в естественной среде, а также подчеркивается их актуальность и эффективность применения в этой области.

Постановка задачи. В рамках данной работы необходимо сравнить различные существующие архитектуры сверточных нейронных сетей, используемых для классификации изображений, с целью выбора наиболее подходящей архитектуры для разработки интеллектуальной системы, предназначенной для распознавания растений на базе методов глубокого машинного обучения. Для достижения этой цели необходимо провести исследование существующих архитектур сверточных нейронных сетей, адаптировать их к задачам классификации растений и разработать стратегии повышения точности модели при использовании данных, собранных в полевых условиях.

Для этого требуется решить следующие основные задачи:

1. Проанализировать и выбрать оптимальную архитектуру нейронной сети. Для этого необходимо изучить существующие архитектуры сверточных нейронных сетей, таких как VGG, ResNet, EfficientNet и других, применяемых в задачах классификации изображений. Задача состоит в выборе наиболее подходящей архитектуры для решения проблемы распознавания растений, принимая во внимание сложность и разнообразие данных [4-6].

2. Собрать данные, сформировать и подготовить датасет. Для обучения сверточной нейронной сети необходимо собрать и подготовить датасет, включающий достаточное количество изображений видов растений, сделанных в природных условиях, с учетом различных углов съемки, освещения, погодных условий и прочих факторов. Это могут быть фотографии различных растений, собранные в естественных условиях, а также данные из ботанических садов и университетов [7-8].

3. Обработать данные. Перед обучением модели данные должны быть обработаны. Это включает в себя аугментацию изображений (изменение масштаба, вращение, изменение яркости и т. д.), чтобы увеличить разнообразие используемых данных и улучшить обобщающую способность модели [9-11].

4. Разработать модель нейронной сети. На данном этапе необходимо спроектировать модель сверточной нейронной сети, провести обучение на подготовленном датасете, настроить гиперпараметры сети (количество слоев, фильтры, функции активации и т. д.). Важным аспектом является предотвращение переобучения модели и достижение высокой обобщающей способности [10-12].

5. Оценить эффективность модели. После обучения модель требуется протестировать на выделенной тестовой выборке данных, чтобы оценить её точность и способность к обобщению. Критерием успешности работы системы будет являться точность классификации, измеряемая с использованием метрик, таких как accuracy, precision, recall и F1-score. Важно также провести валидацию, чтобы минимизировать риск переобучения [10-12].

6. Внедрить. После успешного обучения и тестирования модели, её можно внедрить в практику.

Решение данных задач позволит выбрать оптимальную архитектуру для разработки интеллектуальной системы на базе методов глубокого машинного обучения, способную автоматически и с высокой точностью распознавать различные виды растений в природных условиях, что будет полезно для биологов, экологов и любителей природы.

Основная часть. С развитием технологий искусственного интеллекта, особенно в области машинного обучения, наблюдается значительный прогресс в распознавании объектов на изображениях. Одним из самых перспективных направлений является обнаружение и распознавание растений с использованием сверточных нейронных сетей. Распознавание растений представляет собой важную задачу для экологии, ботаники и сельского хозяйства. Правильная идентификация растений может помочь в мониторинге биоразнообразия, экологических исследований и даже в борьбе с инвазивными видами. Традиционные методы распознавания требуют значительных усилий и времени, а также глубоких знаний в ботанике. Использование технологий машинного обучения, в частности сверточных нейронных сетей, позволяет автоматизировать этот процесс и значительно повысить его эффективность [1-3].

Сверточные нейронные сети – это класс глубоких нейросетей, специально разработанных для обработки данных, имеющих сетевую структуру, таких как изображения. CNN используют свертки, которые позволяют выявлять важные особенности изображения, такие как формы, текстуры и цвета. Эти сети обучаются на больших наборах данных, что позволяет им автоматически извлекать характеристики, способствующие распознаванию объектов [11, 12].

Преимущества использования сверточных нейронных сетей [11, 12]:

- Высокая точность: CNN продемонстрировали способность достигать высокой точности в распознавании объектов на изображениях, что особенно важно для точной идентификации растений.

- Автоматизация процесса: использование нейронных сетей позволяет автоматизировать процесс распознавания, что экономит время и ресурсы.

- Обработка больших объемов данных: CNN могут обрабатывать большие наборы изображений быстро и эффективно, что делает их незаменимыми в условиях, когда необходимо обрабатывать много данных (например, в экологии).

- Постоянное обучение: модели можно обновлять, добавляя новые данные и повышая их точность по мере появления новых видов растений и изменения условий окружающей среды.

Анализ и выбор архитектуры нейронной сети. Для анализа и выбора архитектуры сверточной нейронной сети в данной работе будут рассмотрены две популярные архитектуры – VGG16 и ResNet50. Эти архитектуры широко применяются для задач классификации изображений и отличаются структурой, количеством слоев и подходами к обучению, что позволяет провести их сравнительный анализ в контексте задачи распознавания растений [13-15]. Сравнение архитектур VGG16 и ResNet50 приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение архитектур VGG16 и ResNet50

Параметр	VGG16	ResNet50
Количество параметров	138 миллионов	25 миллионов
Глубина сети	16 слоев	50 слоев
Основной принцип	Последовательные свертки	Остаточные блоки (skip connections)
Производительность	Высокая на простых изображениях	Высокая на сложных изображениях
Проблема переобучения	Часто переобучается	Меньше склонна к переобучению
Время обучения	Дольше из-за большого числа параметров	Быстрее благодаря остаточным связям
Использование памяти	Требуется много памяти	Требуется меньше памяти
Применимость	Хороша для мелких объектов и текстур	Подходит для сложных сцен и объектов

VGG16 – это глубокая сверточная нейронная сеть с простой и глубокой структурой, разработанная группой исследователей из Visual Geometry Group (VGG) Оксфордского университета. Основной особенностью архитектуры является последовательное использование нескольких сверточных слоев с небольшими ядрами (3x3) и слоев объединения (pooling), что позволило сети эффективно анализировать изображения, используя больше слоев для детального извлечения признаков [13].

VGG16 используется для задач классификации изображений, требующих тщательной детальной проработки и распознавания мелких деталей. В контексте распознавания растений эта архитектура может демонстрировать высокие результаты, особенно на изображениях, где имеют значение тонкости текстуры листьев или цветов.

Достоинство архитектуры VGG16 – последовательная и однородная структура. Главный недостаток – большое количество параметров, требующее значительных вычислительных ресурсов [13].

ResNet50 (Residual Network) – это архитектура, разработанная группой Microsoft Research, которая использует остаточные блоки (residual blocks), что помогает избежать проблемы затухания градиентов. ResNet использует "прямые" связи через слои, что позволяет строить очень глубокие нейросети с большим количеством слоёв [14, 15].

ResNet50 – универсальная архитектура, подходящая для различных задач компьютерного зрения, используется в задачах, где необходимо эффективно работать с очень глубокими нейронными сетями. Для задачи распознавания растений ResNet50 показывает высокую точность, особенно на изображениях, содержащих множество визуальных деталей, например, леса или парки [14, 15].

Формирование и подготовка датасета. Для обучения модели был использован набор данных из 4317 изображений растений, разделенных на пять классов: ромашка, одуванчик, роза, подсолнух и тюльпан. Изображения охватывают различные условия съемки, включая разные углы, освещение и фон, что повышает способность модели к обобщению и улучшает точность распознавания растений в естественных условиях [11, 12].



Рис. 1. Пример растений из датасета

Обучение модели на архитектуре VGG16. Обучение модели было проведено на архитектуре VGG16. Данная сеть отличается своей простой и последовательной структурой. Она состоит из 16 слоев, включающих блоки сверток с маленькими фильтрами (3x3), что позволяет эффективно извлекать ключевые признаки изображения и подходит для классификации с высокой детализацией, например, текстур и форм растений [13].

Этапы обучения модели VGG16 [13].

1. Подготовка данных. Использовался ImageDataGenerator для нормализации данных и генерации выборок. Обучающие и проверочные данные были разделены в пропорции 80% и 20% соответственно, что позволило создать сбалансированный набор для обучения и тестирования модели.

2. Заморозка базовой модели. Все слои VGG16 были заморожены, что сохранило предобученные веса и использовало их для более быстрого и стабильного обучения. Поверх базовой модели были добавлены несколько полносвязных слоев для классификации, что позволило адаптировать модель к пяти целевым классам растений.


```
# Добавляем собственные слои
x = Flatten()(base_model.output)
x = Dense(256, activation='relu')(x)
x = Dense(128, activation='relu')(x)
x = Dense(num_classes, activation='softmax')(x) # Пять классов цветов

model = Model(inputs=base_model.input, outputs=x)

# Компиляция модели
model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.0001),
loss='categorical_crossentropy', metrics=['accuracy'])
# Настройка генератора данных для загрузки изображений
datagen = ImageDataGenerator(rescale=1.0/255.0, validation_split=0.2)
train_generator = datagen.flow_from_directory(
    'dataset', # Укажите путь к папке с пятью подкаталогами для каждого
цветка
    target_size=(224, 224),
    batch_size=32,
    class_mode='categorical',
    subset='training'
)
validation_generator = datagen.flow_from_directory(
    'dataset',
    target_size=(224, 224),
    batch_size=32,
    class_mode='categorical',
    subset='validation'
)

# Обучение модели
history = model.fit(
    train_generator,
    validation_data=validation_generator,
    epochs=10,
    verbose=1
)

# Оценка модели
validation_generator.reset()
predictions = model.predict(validation_generator,
steps=validation_generator.samples // validation_generator.batch_size + 1)
predicted_classes = np.argmax(predictions, axis=1)
true_classes = validation_generator.classes
class_labels = list(validation_generator.class_indices.keys())
# Отчет по классификации
print(classification_report(true_classes, predicted_classes,
target_names=class_labels))
model.save('flower_recognition_model.keras') # Сохранит модель в
формате .keras
```

Обучение модели на архитектуре ResNet50. Для сравнения с VGG16 обучение проводилось на архитектуре ResNet50, которая показала высокую эффективность при работе с глубокими сверточными нейронными сетями и изображениями высокой сложности.

Для настройки модели использовались следующие этапы [14, 15]:

1. Подготовка данных. Использовался генератор данных ImageDataGenerator с параметрами для нормализации изображений (преобразование значений пикселей в диапазон от 0 до 1) и разделения данных на тренировочную и проверочную выборки в соотношении 80% к 20%. Это позволило эффективно подготовить изображения и избежать переобучения модели на тренировочной выборке.

2. Заморозка базовой модели. Все слои базовой модели ResNet50 были заморожены, чтобы избежать их изменения во время обучения. На выходах сети были добавлены полносвязные слои для классификации с использованием функции активации softmax для предсказания вероятностей по каждому из пяти классов.

3. Обучение модели. Для оптимизации использовался алгоритм Adam с начальной скоростью обучения 0.0001, а в качестве функции потерь применялась categorical_crossentropy. Обучение выполнялось в течение 10 эпох, что позволило достичь хорошей сходимости и точности классификации. Параметры модели были настроены таким образом, чтобы избежать переобучения и улучшить обобщающую способность сети при работе с новыми изображениями.

4. Оценка точности. После обучения модели на тренировочной выборке была проведена оценка ее точности на проверочной выборке, с расчетом метрик accuracy, precision, recall и F1-score. Эти показатели продемонстрировали высокую точность модели в распознавании каждого из пяти видов растений, что подтверждает эффективность предложенного подхода.

Результат обучения модели ResNet50 показан на рисунке 3.

Epoch 1/10				
109/109	122s	1s/step	accuracy: 0.3236	loss: 1.6046 - val_accuracy: 0.3698 - val_loss: 1.5701
Epoch 2/10				
109/109	114s	1s/step	accuracy: 0.3701	loss: 1.4865 - val_accuracy: 0.4291 - val_loss: 1.3525
Epoch 3/10				
109/109	113s	1s/step	accuracy: 0.4520	loss: 1.3668 - val_accuracy: 0.4907 - val_loss: 1.2768
Epoch 4/10				
109/109	114s	1s/step	accuracy: 0.4820	loss: 1.2851 - val_accuracy: 0.5163 - val_loss: 1.2412
Epoch 5/10				
109/109	114s	1s/step	accuracy: 0.4891	loss: 1.2757 - val_accuracy: 0.5081 - val_loss: 1.2132
Epoch 6/10				
109/109	113s	1s/step	accuracy: 0.5385	loss: 1.1950 - val_accuracy: 0.5035 - val_loss: 1.2496
Epoch 7/10				
109/109	114s	1s/step	accuracy: 0.5317	loss: 1.1957 - val_accuracy: 0.5314 - val_loss: 1.2132
Epoch 8/10				
109/109	113s	1s/step	accuracy: 0.5614	loss: 1.1329 - val_accuracy: 0.4837 - val_loss: 1.2782
Epoch 9/10				
109/109	113s	1s/step	accuracy: 0.5473	loss: 1.1725 - val_accuracy: 0.5314 - val_loss: 1.1677
Epoch 10/10				
109/109	114s	1s/step	accuracy: 0.5499	loss: 1.1393 - val_accuracy: 0.5419 - val_loss: 1.1459
27/27	22s	794ms/step		
	precision	recall	f1-score	support
daisy	0.16	0.18	0.17	152
dandelion	0.27	0.42	0.33	210
rose	0.17	0.19	0.18	156
sunflower	0.15	0.08	0.10	146
tulip	0.27	0.17	0.21	196
accuracy			0.22	860
macro avg	0.21	0.21	0.20	860
weighted avg	0.21	0.22	0.21	860

Рис. 3. Результат обучения модели ResNet50

Пример кода для обучения модели ResNet50.

```
# Загрузка предобученной модели ResNet50
base_model = ResNet50(weights='imagenet', include_top=False,
input_shape=(224, 224, 3))
```

```

# Замораживаем базовые слои
for layer in base_model.layers:
    layer.trainable = False
# Добавляем собственные слои
x = Flatten()(base_model.output)
x = Dense(256, activation='relu')(x)
x = Dense(128, activation='relu')(x)
x = Dense(num_classes, activation='softmax')(x) # Пять классов растений
model = Model(inputs=base_model.input, outputs=x)
# Компиляция модели
model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.0001),
loss='categorical_crossentropy', metrics=['accuracy'])
# Настройка генератора данных для загрузки изображений
datagen = ImageDataGenerator(rescale=1.0/255.0, validation_split=0.2)
train_generator = datagen.flow_from_directory(
    'dataset', # Путь к папке с пятью подкаталогами для каждого растения
    target_size=(224, 224),
    batch_size=32,
    class_mode='categorical',
    subset='training'
)
validation_generator = datagen.flow_from_directory(
    'dataset',
    target_size=(224, 224),
    batch_size=32,
    class_mode='categorical',
    subset='validation'
)

# Обучение модели
history = model.fit(
    train_generator,
    validation_data=validation_generator,
    epochs=10,
    verbose=1
)

# Оценка модели
validation_generator.reset()
predictions = model.predict(validation_generator,
steps=validation_generator.samples // validation_generator.batch_size + 1)
predicted_classes = np.argmax(predictions, axis=1)
true_classes = validation_generator.classes
class_labels = list(validation_generator.class_indices.keys())
# Отчет по классификации
print(classification_report(true_classes, predicted_classes,
target_names=class_labels))
# Сохранение модели
model.save('flower_recognition_resnet50.h5')

```

На основе представленных данных по обучению моделей VGG16 (рис. 2) и ResNet50 (рис. 3) для задачи распознавания растений можно сделать несколько выводов относительно их производительности, точности и потенциала для улучшения. Рассмотрим подробнее результаты каждой модели.

Результаты распознавания. Результат распознавания растения VGG16 показан на рисунке 4. Результат распознавания растения ResNet50 показан на рисунке 5.



Рис. 4 Результат распознавания растения VGG16

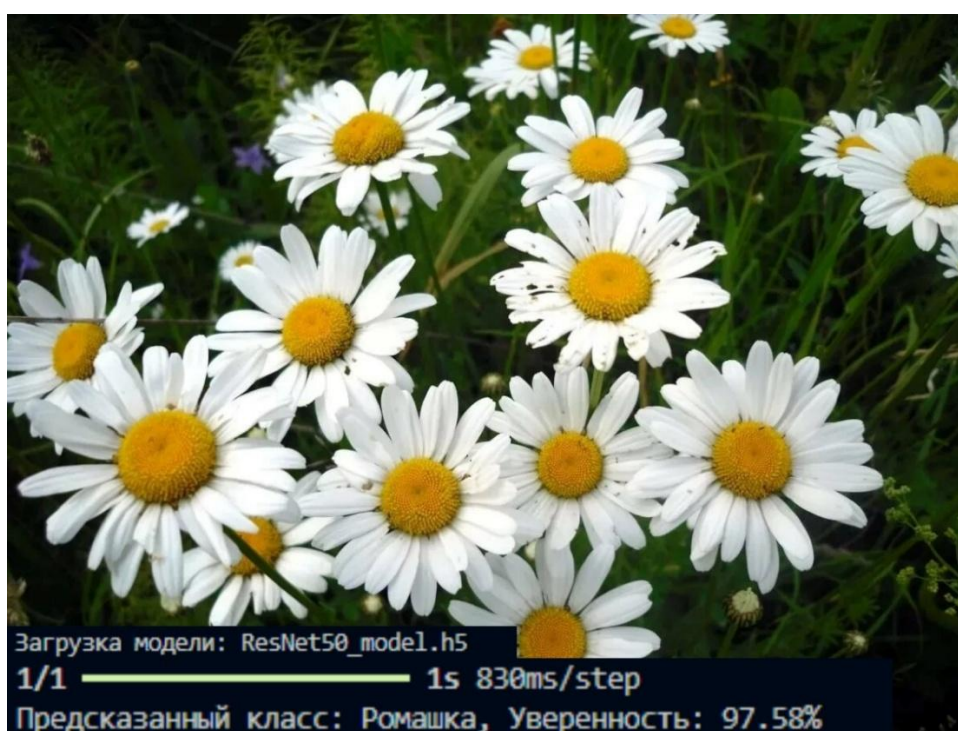


Рис. 5. Результат распознавания растения ResNet50

Результаты модели VGG16. Модель VGG16 демонстрирует сравнительно высокую точность и низкие потери на тренировочной выборке, достигая итоговой точности (ассурасу) на уровне 98.1% на тренировочных данных и 82.3% на проверочной выборке после 10 эпох обучения. Это говорит о хорошем уровне обучения модели и её способности улавливать особенности изображений для каждого класса.

Однако детализированные метрики (precision, recall, f1-score) для каждого класса показывают, что VGG16 имеет проблемы с распознаванием отдельных классов. Например, точность (precision) для классов "daisy", "rose" и "sunflower" остаётся низкой, что указывает на путаницу между этими классами. Данное поведение может быть связано с ограниченной способностью модели к обобщению на проверочной выборке или с недостаточной дифференциацией текстур и формы у некоторых видов растений.

Положительной стороной использования VGG16 является её способность извлекать детальные признаки благодаря глубокой и последовательной структуре, что помогает в задачах, где важна высокая детализация объектов. Тем не менее, структура сети также создаёт определённые сложности:

Переобучение. Из-за большого количества параметров модель может склоняться к запоминанию тренировочных данных, что приводит к снижению точности на проверочной выборке.

Большие вычислительные затраты. Модель требует значительных вычислительных ресурсов для обучения, что может затруднить её использование на устройствах с ограниченными ресурсами.

Результаты модели ResNet50. Модель ResNet50 продемонстрировала более низкие результаты на проверочной выборке по сравнению с VGG16. Итоговая точность модели на тренировочной выборке составляет 54.9%, а на проверочной – 54.1%. Эти результаты указывают на ограниченные возможности модели для данной задачи в текущей настройке и с предоставленным набором данных.

Тем не менее, ResNet50 имеет преимущества в плане устойчивости к переобучению благодаря остаточным блокам, которые помогают избежать градиентного затухания при прохождении сигнала через слои. Данная архитектура, как правило, хорошо подходит для более сложных изображений и глубоких сетей, однако, в данном случае её производительность оказалась ниже ожидаемой.

Причины, по которым ResNet50 могла показать более низкие результаты:

Недостаток данных. В случае ограниченного количества тренировочных изображений, модель может быть не в состоянии выучить необходимые признаки, что приводит к низкой точности.

Недостаточная адаптация под задачу. Возможно, что модель требует более тонкой настройки гиперпараметров или изменения структуры для оптимизации работы с конкретными классами растений.

Сравнительный анализ. Обе модели имеют свои преимущества и недостатки. VGG16 показывает более высокую точность на тренировочных данных, но склонна к переобучению и требует значительных вычислительных ресурсов. ResNet50, несмотря на более низкую точность, предлагает устойчивость к градиентному затуханию и лучше подходит для более глубоких сетей, хотя требует большего количества данных для эффективного обучения.

В качестве дополнительных моделей, которые могли бы подойти для задачи распознавания растений, можно рассмотреть архитектуры [8, 9, 10]:

InceptionV3 – данная модель может извлекать более сложные пространственные признаки и обеспечивает хороший компромисс между точностью и вычислительными затратами.

MobileNet – эта модель отличается лёгкостью и быстрой работой, что делает её подходящей для развёртывания на устройствах с ограниченными ресурсами, например, мобильных приложениях. Однако, из-за её упрощённой структуры она может показывать более низкую точность по сравнению с VGG16 и ResNet50.

Недостатки этих архитектур:

InceptionV3: сложность настройки и более высокая вычислительная сложность по сравнению с ResNet50.

MobileNet: компромисс между точностью и скоростью может привести к снижению качества классификации для схожих классов растений.

Выводы. В данной статье рассмотрены и проанализированы различные модели обнаружения и распознавания растений. Выбор модели для распознавания растений должен зависеть от доступных вычислительных ресурсов и требований к точности. VGG16 показала наилучшие результаты для данной задачи, однако для практического применения на устройствах с ограниченными ресурсами может потребоваться более лёгкая модель, такая как MobileNet, или дальнейшая оптимизация ResNet50.

Сверточные нейронные сети представляют собой мощный инструмент для обнаружения и распознавания растений в природе. Их применение не только упрощает процесс идентификации, но также способствует более глубокому изучению экосистем и обеспечению их охраны. В будущем, с дальнейшим развитием технологий и увеличением доступности данных, ожидается, что применение сверточных нейронных сетей в ботанике и экологии станет ещё более актуальным и распространённым.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Распознавание растений с помощью нейронных сетей. Object Detection YOLOv7 [Электронный ресурс] / TenChat: [Сайт]. – URL: <https://tenchat.ru/media/1403187-raspoznavaniye-rasteniy-s-pomoschyu-neyronnykh-setey-object-detection-yolov7> (дата обращения: 15.10.2023).
2. Новый подход к машинному обучению в биологии [Электронный ресурс] / Научная культура: [Сайт]. – URL: <https://www.nkj.ru/news/41845/> (дата обращения: 15.10.2023).
3. Нейросети научились распознавать более 90% снимков российских растений [Электронный ресурс] / ТАСС: [Сайт]. – URL: https://nauka.tass.ru/nauka/11942297?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 15.10.2023).
4. Руководство TensorFlow [Электронный ресурс] / TensorFlow: [Сайт]. – URL: <https://www.tensorflow.org/tutorials?hl=ru> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Библиотека глубокого обучения Tensorflow [Электронный ресурс] / Хабр: [Сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/ods/articles/324898/> (дата обращения: 20.09.2024).
6. Иванов Григорий. Свёрточные нейронные сети [Электронный ресурс] / Яндекс Практикум: [Сайт]. – URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/svyortochnye-nejroseti> (дата обращения: 15.10.2024).
7. Implementing Neural Networks Using TensorFlow [Электронный ресурс] / GeeksForGeeks: [Сайт]. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/implementing-neural-networks-using-tensorflow/> (дата обращения: 15.10.2024).
8. Сикорский О.С. Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений [Электронный ресурс] / КиберЛенинка: [Сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-svyortochnyh-neyronnyh-setey-dlya-zadachi-klassifikatsii-izobrazheniy> (дата обращения: 16.10.2024).
9. Sovit Ranjan Rath. Implementing VGG Neural Networks in a Generalized Manner using PyTorch [Электронный ресурс] / DebuggerCafe: [Сайт]. – URL: <https://debuggercafe.com/implementing-vgg-neural-networks-in-a-generalized-manner-using-pytorch/> (дата обращения: 18.10.2024).
10. Sovit Ranjan Rath. Object Detection using SSD300 ResNet50 and PyTorch [Электронный ресурс] / DebuggerCafe: [Сайт]. – URL: <https://debuggercafe.com/object-detection-using-ssd300-resnet50-and-pytorch/> (дата обращения: 18.10.2024).
11. Writing Custom Datasets, DataLoaders and Transforms [Электронный ресурс] / PyTorch: [Сайт]. – URL: https://pytorch.org/tutorials/beginner/data_loading_tutorial.html (дата обращения: 20.09.2023).
12. Подготовка датасета для машинного обучения: 10 базовых способов совершенствования данных [Электронный ресурс] / Хабр: [Сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/684580/> (дата обращения: 29.09.2023).
13. Архитектура VGG16 с примерами [Электронный ресурс] / GitHub: [Сайт]. – URL: <https://github.com/LemonLov/Vgg16-Tensorflow> (дата обращения: 28.09.2024).
14. Про архитектуру ResNet50 с кодом [Электронный ресурс] / GitHub: [Сайт]. – URL: https://github.com/JananiSBabu/ResNet50_From_Scratch_Tensorflow (дата обращения: 25.09.2024).
15. Разработка интерфейса для модели ResNet50 CNN с Keras [Электронный ресурс] / Хабр: [Сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/746442/> (дата обращения: 26.09.2024).

Поступила в редакцию 18.12.2025 г., рекомендована к печати 13.01.2025 г.

DETECTION AND RECOGNITION OF PLANTS IN NATURE USING CONVOLUTIONAL
NEURAL NETWORKS

Solokha P.M., Nestrugina E.S.

This article discusses and analyzes various models of plant detection and recognition using convolutional neural networks to identify different plant species in natural conditions. The advantages of using artificial intelligence in this area are shown. The existing architectures of convolutional neural networks used for image classification are considered, their comparative characteristics are given, and their advantages and disadvantages are identified. Examples of model training on the VGG16 and ResNet50 architectures are given. The optimal architecture of the convolutional neural network for solving the problem of plant recognition is selected.

Keywords: computer vision, deep machine learning, plant detection and recognition, convolutional neural networks, model training.

Солоха Павел Михайлович

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

Solokha Pavel Mikhailovich

Master of Computer Technology Department of
Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Нестругина Елена Сергеевна

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

Nestrugina Elena Sergeevna

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

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОЦИАЛЬНОГО ГРАФА ОНЛАЙН СЕТИ

© 2025 Морозов С.А., Морозова Н.И., Лозовик Е.Г.

Приведено описание процесса сканирования онлайн-социальной сети, описаны основные свойства социального графа, влияющие на анализ собранных данных на основе алгоритмов машинного обучения. Приведен механизм и результаты визуализации социального графа.

Ключевые слова: социальная сеть, сетевой анализ, социальный граф, машинное обучение, визуализация социального графа.

Введение. Распространение социальных сетей и их роль в современном обществе является одними из интересных новшеств в последние годы, которое привлекает внимание исследователей, журналистов, компаний и правительство. Теоретико-методологической основой исследования послужили концепции и гипотезы отечественных и зарубежных учёных, посвящённые проблемам моделирования и визуализации социальных сетей на основе методов искусственного интеллекта. В работах [1-3] нами уже было рассмотрено значение сетевого анализа, этапы развития анализа социальных сетей, а также основные понятия и виды социального графа. Проведён анализ процесса сканирования, получена информация о пользователях социальной сети, подробно проведен обзор алгоритма первого поиска. Проведён сравнительный анализ программного обеспечения для анализа графа, в ходе которого выбран язык программирования Python, были применены основные алгоритмы выделения сообществ. В результате работы с образцом данных социальной сети ВКонтакте на основе методов машинного обучения нами был просканирован граф с использованием техники BFS.

Нынешнее исследование связано с изучением механизмов обнаружения сообществ, обнаружением связи между пользователями в структуре сообществ и способами улучшения обнаружения сообщества на основе предпочтений пользователей.

Основные свойства социального графа. Социальный граф – это специальный вид графов, который характеризуется следующим набором свойств (этот список свойств не является полным, однако, на нем видна специфичность именно социальных графов, что позволяет выделить их в отдельный тип) [4]:

1. Одна большая общая компонента связности. В большинстве социальных графов присутствует одна большая компонента связности, которая захватывает большинство вершин. Остальные компоненты гораздо меньшего размера, возможно, они являются даже отдельными одиночными вершинами, как часто бывает в случае с графами социальных сетей [5].

2. Распределение на степенях вершин. Социальные сети относятся к так называемым безмасштабным сетям (Scale-free network). Это значит, что количество вершин со степенью k убывает как $k^{-\gamma}$ [6]. Распределения степеней вершин в современных социальных сетях показывает, что они являются безмасштабными, т.е. необходимо изучать как входящую (снизу), так и исходящую (сверху) степень вершин [6].

3. Среднее расстояние. Под расстоянием между вершинами понимают минимальную длину цепи в графе, соединяющие эти вершины. Социальные сети в среднем имеют очень маленькое расстояние между двумя случайными вершинами. Это свойство может быть продемонстрировано на модели современного общества. Существует так называемый феномен тесного мира (или теория шести рукопожатий), согласно которому любые два человека на Земле разделены в среднем пятью уровнями общих знакомых и, соответственно, шестью уровнями связей. Позже это факт неоднократно подтверждался на основе данных современных социальных сетей. На рис. 1 изображена функция соседства, которая показывает долю пользователей социальной сети, которые находятся на расстоянии h связей друг от друга. Среднее расстояние между пользователями было равно 4.7 [5].

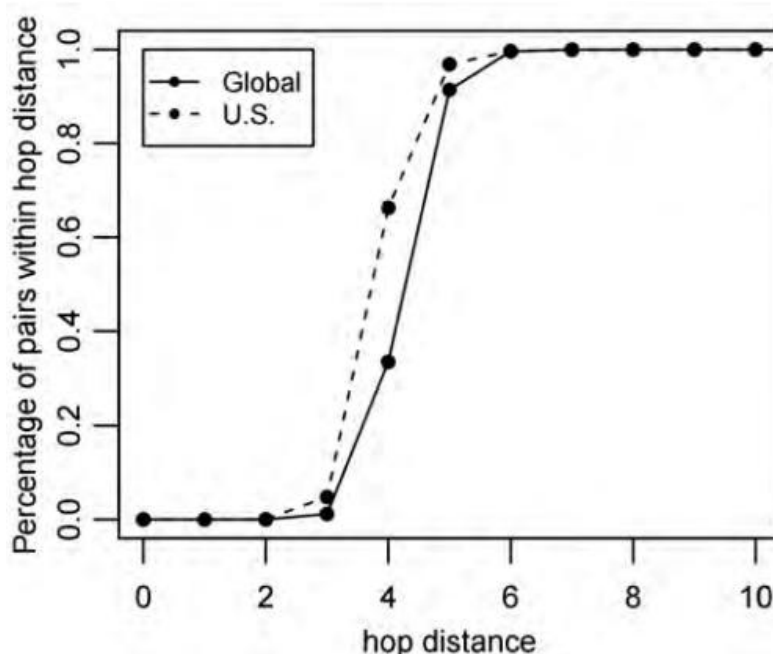


Рис. 1. Функция соседства $N(h)$

4. Коэффициент кластеризации. Существует множество коэффициентов для графа, которые показывают некоторую его качественную характеристику. Обычно эту характеристику сравнивают с её средним значением на случайном графе (например, на модельном графе Эрдёша-Реньи) [7] и смотрят, значимо ли она отличается для исследуемого графа.

Так, коэффициент кластеризации основывается на том факте, что если вершины (например, люди) A , B и A , C соединены (знакомы) в социальном графе, то с большой вероятностью B и C тоже соединены (знакомы). Если B и C действительно соединены, это называется закрытым триплетом, если нет – открытым. Коэффициент вычисляется как доля закрытых триплетов среди всех триплетов и может интерпретироваться как степень кластеризации данного графа (рис. 2). Считается количество закрытых триплетов, в которые входит вершина A . Для того чтобы получить коэффициент кластеризации для всего графа, достаточно усреднить значения коэффициента для всех вершин. Если коэффициент принимает значения близкие к 1, то в графе много треугольников и вершины склонны образовывать связь, если они соединены через третью вершину. Соответственно, если значение близко к 0, то имеет место обратная тенденция. Социальный граф обладает большим коэффициентом кластеризации.

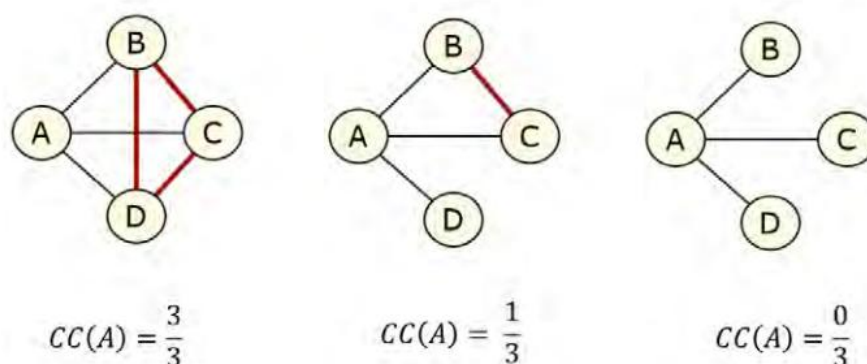


Рис. 2. Коэффициенты кластеризации для вершины A для трех случаев

5. Структура сообществ. Коэффициент кластеризации показывает, насколько сильно вершины склонны образовывать группы (или сообщества), которые характеризуются тем, что вершины, входящие в одну группу, соединены между собой гораздо плотнее, чем со всем остальным графом. Умение выделять сообщества из графа позволяет многое понять про сам граф. Так, размеры современных графов превышают сотни тысяч вершин и миллионы ребер, поэтому стандартное представление графа теряет свою информативность. Если объединить вершины в сообщества, то можно без потери информации о структуре графа исследовать его на более абстрактном уровне. На рис. 3 дан пример графов на одних и тех же вершинах. Первый явно имеет три сообщества, а второй нет.

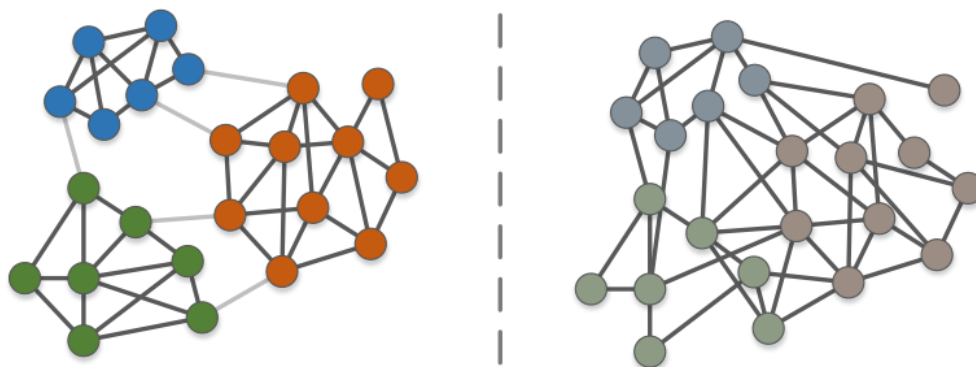


Рис. 3. Пример графа, который имеет структуру из трех сообществ (слева) и графа на тех же вершинах, который её не имеет (справа)

Визуализации социального графа. В работе [1] был проанализирован граф ВКонтакте с помощью Python, взятый из первого набора данных. Далее для графа были предоставлены чертежи, и измерены свойства, такие как коэффициент кластеризации, среднее распределение степени, распределение центральности между центрами, распределение центральной близости, центральные значения собственных векторов и модульность. Для этого граф, состоящий из 124267 ребер и 100390 узлов, был импортирован в Python. На рис. 4 представлена визуализация графа. Размер узла означает степень (чем больше узел, тем выше уровень), а цвет узлов обозначает сообщества, которые были обнаружены (26 сообществ).

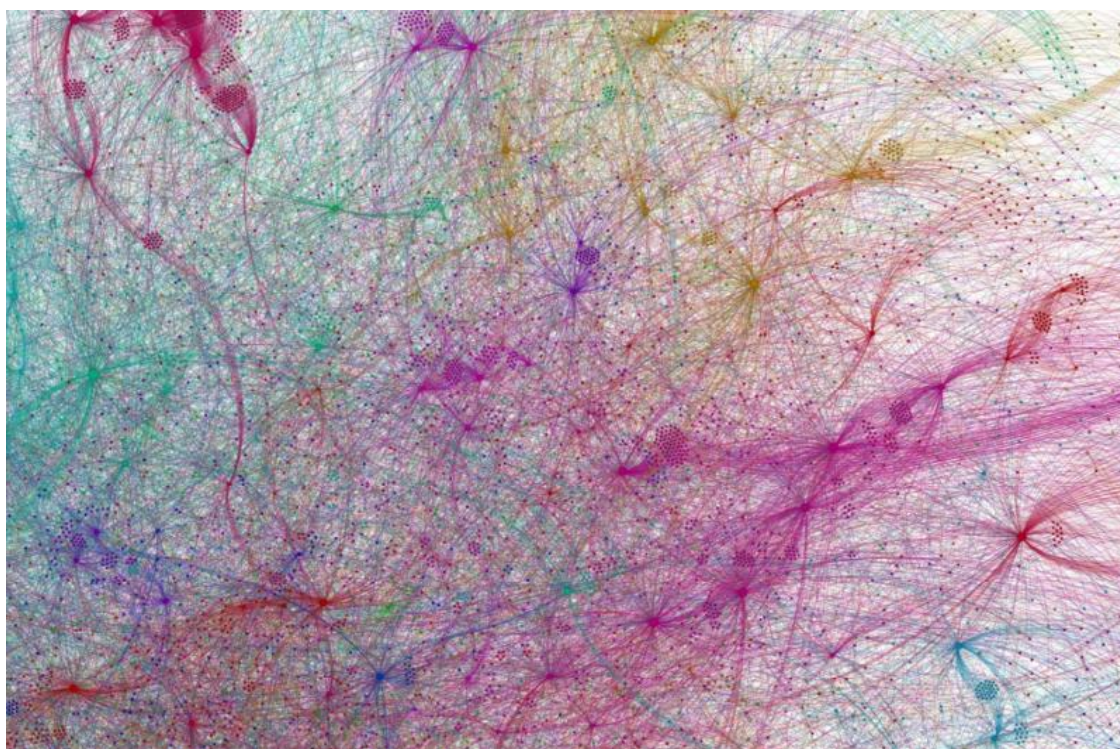


Рис. 4. Граф с узлами сообществ ВКонтакте

На рис. 5 представлены некоторые из показателей, которые реализованы с помощью Python. Вычисляя, представляем степень распределения узлов первого уровня друзей графика, средний балл которого равен 366,093.

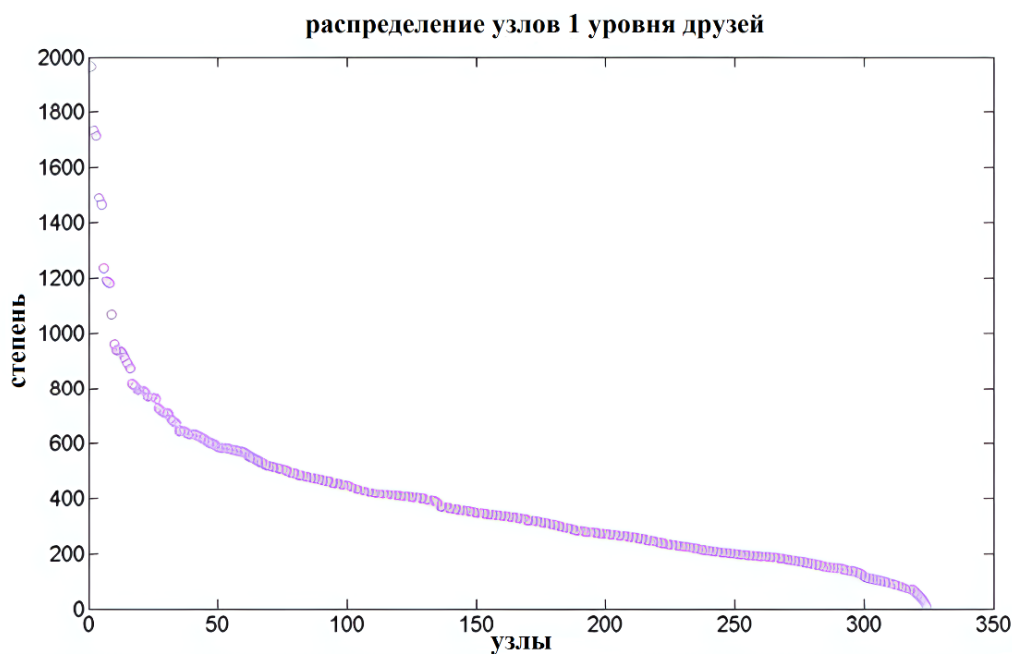


Рис. 5. Распределение первого уровня узлов (друзей)

Степень узлов в реальных социальных сетях в больших масштабах часто соответствует распределению степенного закона (рис. 6).

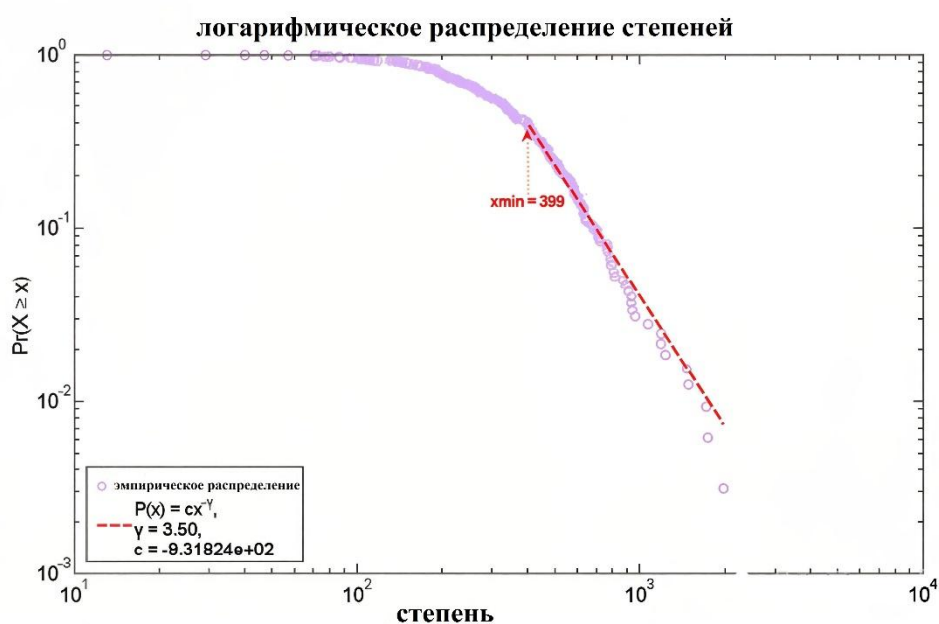


Рис. 6. Распределение

Используемый здесь алгоритм основан на публикации [8]. Ульрик Брандес вводит более эффективные алгоритмы, основанные на новом методе накопления, который хорошо интегрируется с алгоритмами обхода, решающими проблему с короткими путями с одним источником, используя разреженность типичных экземпляров. Это расширяет диапазон сетей, для которых можно вычислить центральность между значениями, одновременно оценивая все стандартные индексы центральности на основе кратчайших путей, тем самым уменьшая требования времени и пространства. Распределения представлены на рисунках 7-10.

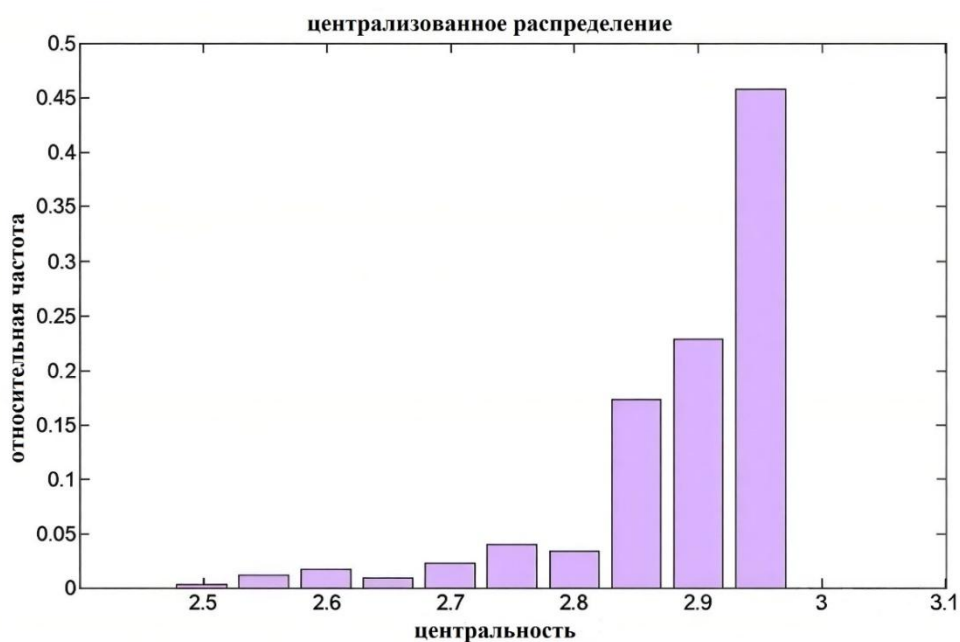


Рис. 7. Распределение центральности относительно близости

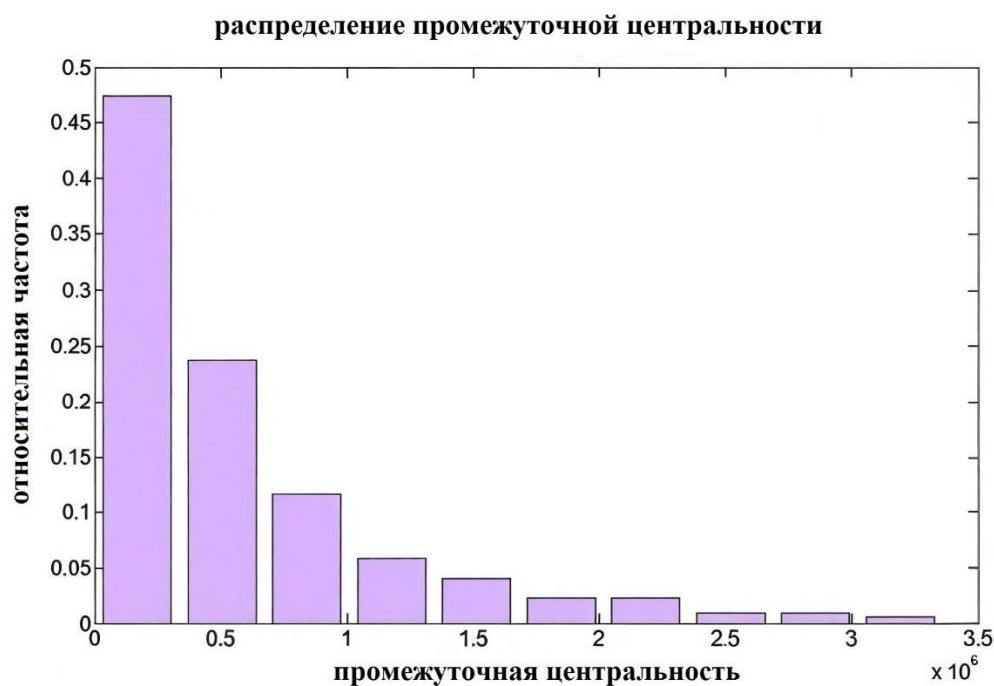


Рис. 8. Распространение централизованного распределения

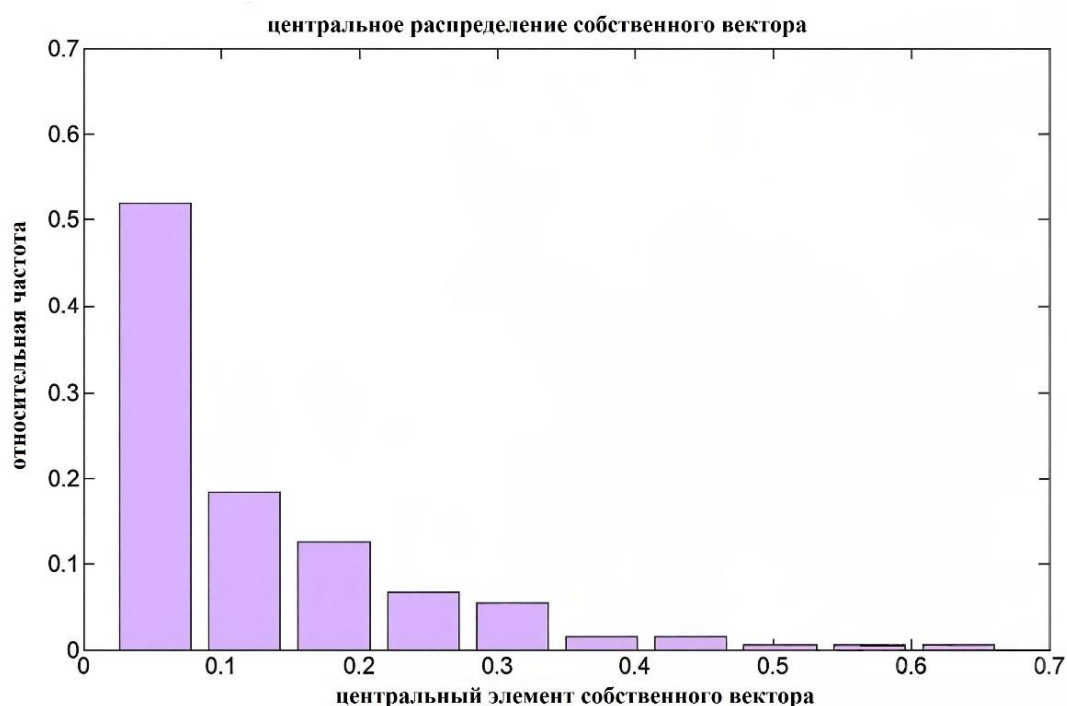


Рис. 9. Распространение централизованного вектора

Основываясь на расчетах Маттиу Латапи, были произведены вычисления треугольников главной памяти для очень больших графов и представлен кластерный коэффициент узлов первого уровня графа. Средний коэффициент кластеризации: 0,0935 (средний коэффициент кластеризации – среднее значение всех отдельных коэффициентов). Всего треугольников: 25751.

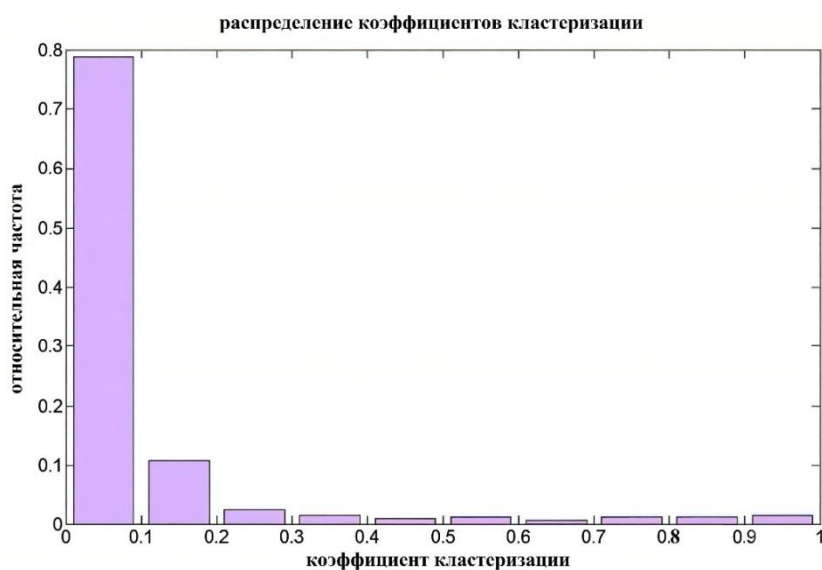


Рис. 10. Распределение кластеров

Алгоритм модульности основан на методе, опубликованном в [9]. Метод оптимизации модулярности очень быстро анализирует сети исключительного размера, – так, анализ сети из двух миллионов узлов занимает приблизительно две минуты.

Два шага повторяются итеративно в методе оптимизации модулярности до максимума:

1. Метод оптимизации модулярности ищет «небольшие» сообщества, оптимизируя модульность локально.

2. Объединяет узлы одного и того же сообщества, создавая новую сеть сообществ. Запуск программы приводит к нескольким разделам, сообществам небольших размеров. По мере того как процесс повторяется, все больше и больше сообществ обнаруживаются из-за агрегации, что приводит к иерархической декомпозиции сети (рис. 11).

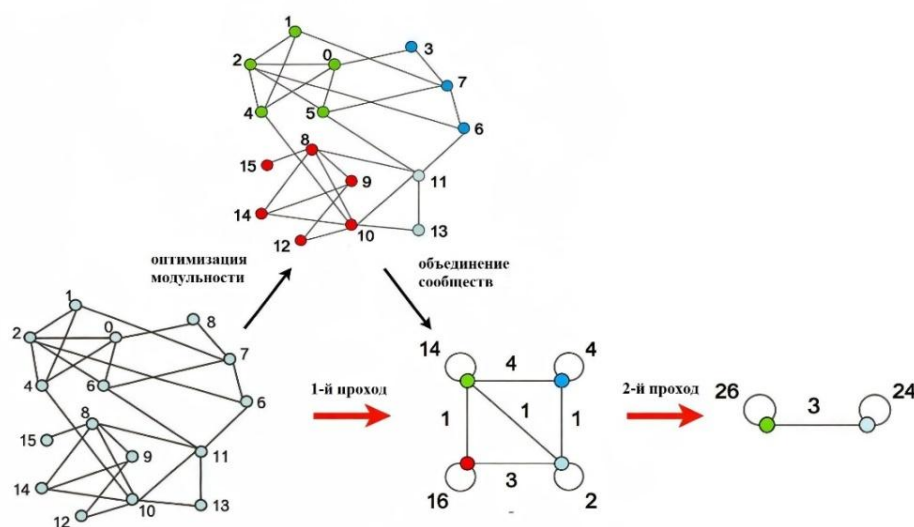


Рис. 11. Визуализация шагов алгоритма Лувена

При реализации алгоритма на полном графике разворачиваются 26 сообществ с модулярностью 0,684. Чтобы проверить эффективность алгоритма, импортируем в Python только первые два уровня сканирования узлов и ребер (исходный узел и друзья). При модулярности 0,614 возвращаются девять общин. Визуализация графика и сообщества показана на рис. 12.

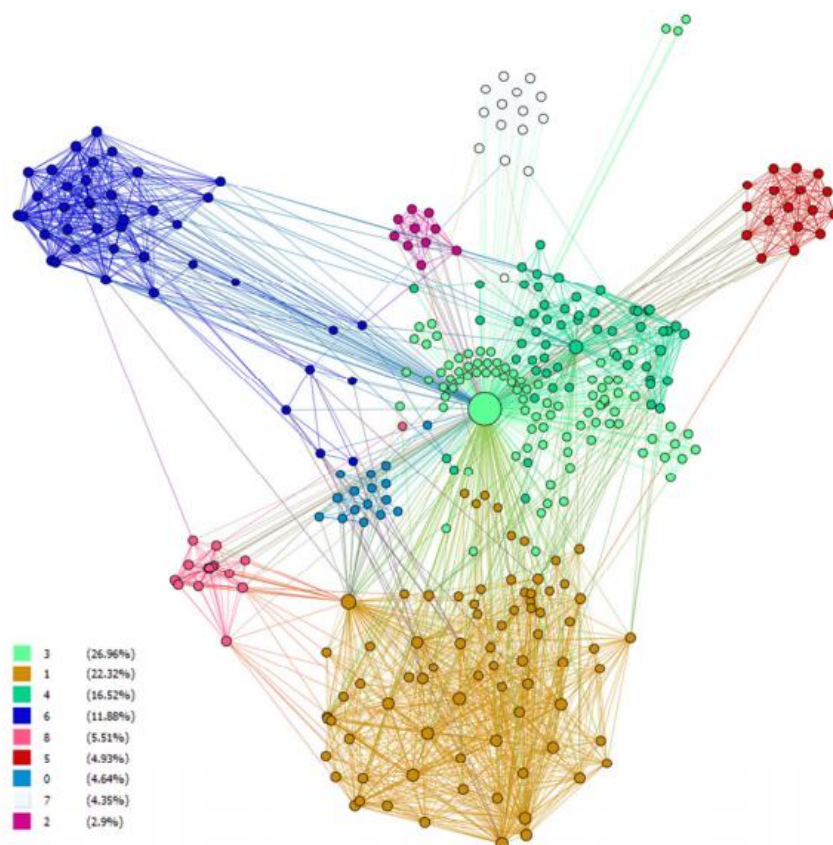


Рис. 12. График друзей

Было обнаружено, что развернутые сообщества соответствуют реальным социальным группам друзей и знакомых автора. На рисунке 13 представлены участники сообществ.

0	друзья авторов по программе студенческого обмена
1	авторская группа близких друзей 1
2	авторы - бывшие коллеги
3	авторы и случайные друзья, которых не удалось объединить
4	авторская группа близких друзей 2
5	друзья авторов по службе
6	друзья автора со школы
7	друзья автора с магистратуры
8	друзья автора с баскетбольного клуба

Рис. 13. Участники сообщества

Выводы. Анализ социальных сетей, без сомнения, является одним из самых интересных явлений последних лет. Для анализа была выбрана популярной онлайн сеть с миллионами пользователей по всему миру – ВКонтакте. Для получения образца данных из ВКонтакте использовались методы машинного обучения и сканирование графа ВКонтакте с использованием техники BFS.

Результатом применения методов анализа социальной сети является сканирование собранные данные и визуальное построение графика дружеских отношений ВКонтакте.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Морозова, Н. И. Исследование возможности применения методов машинного обучения для прогнозирования развития отраслей науки / Н. И. Морозова, А. Н. Береза, Н. В. Береза // Системы управления и информационные технологии. – 2022. – № 2(88). – С. 81-87. – DOI 10.36622/VSTU.2022.88.2.016. – EDN LNXYYK.
2. Intelligent analysis of social networks based on machine learning algorithms / N. I. Morozova, E. G. Lozovik, S. A. Morozov, N. V. Bereza // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS): Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA, 01–10 января 2024 года. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House LLC, 2024. – P. 44-54. – EDN NIPNGS.
3. Morozova, N. I. Prospects for the development of Big data technologies in recommendation tourism systems / N. I. Morozova, I. B. Kushnir // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2023'AS): Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA, 15 ноября 2022 года – 15 января 2023 года. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House LLC, 2023. – P. 162-169. – EDN KDUVNU.
4. Easley, D. Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World / D. Easley, J. Kleinberg // Cambridge University Press, 2010. – 833 p. – ISBN 9780511761942. – DOI <https://doi.org/10.1017/CBO9780511761942>.
5. Fortunato, S. Community detection in graphs // Physics Reports. – V. 486. – Iss. 3–5. – 2010. – P. 75-174. – ISSN 0370-1573. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2009.11.002>.
6. Measurement and Analysis of Online Social Networks Systems / E. Ferrara // In: Alhajj, R., Rokne, J. (eds) Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining. Springer, New York, 2014. – DOI https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6170-8_242.
7. Performance criteria for graph clustering and Markov cluster experiments [Электронный ресурс] / S. V. Dongen // Information Systems (INS). – 2000. – ISSN 1386-3681. – URL: <https://ir.cwi.nl/pub/4461/04461D.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
8. A faster algorithm for betweenness centrality / U. Brandes // The Journal of Mathematical Sociology. – 2001. – V. 25(2). – P. 163–177. – DOI <https://doi.org/10.1080/0022250X.2001.9990249>.
9. Fast Unfolding of Communities in Large Networks / V. Blondel, J. Guillaume, R. Lambiotte, E. Lefebvre // Journal of Statistical Mechanics Theory and Experiment. – 2008. – DOI 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.

Поступила в редакцию 22.12.2024 г., рекомендована к печати 17.01.2025 г.

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR VISUALIZATION OF THE SOCIAL GRAPH

Morozov S.A., Morozova N.I., Lozovik E.G.

The process of scanning an online social network is described, and the main properties of the social graph that affect the analysis of collected data based on machine learning algorithms are described. The mechanism and results of visualization of the social graph are presented.

Keywords: social network, network analysis, social graph, machine learning, visualization of the social graph.

Морозов Сергей Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и радиотехники ИСОиП (филиала) ДГТУ в г. Шахты, Российская Федерация, г. Шахты.
E-mail: morozov.s.a.1984@gmail.com

Morozov Sergei Anatolevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Information Systems and Radio Engineering of ISOiP (branch) DSTU in Shakhty, Russian Federation, Shakhty.

Морозова Нелли Игоревна

кандидат философских наук, доцент кафедры информатики ИСОиП (филиала) ДГТУ в г. Шахты, Российская Федерация, г. Шахты.
E-mail: morozova-nelli-86@yandex.ru

Morozova Nelli Igorevna

Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor at Department of Informatics of ISOiP (branch) DSTU in Shakhty, Russian Federation, Shakhty.

Лозовик Екатерина Георгиевна

старший преподаватель кафедры информатики ИСОиП (филиала) ДГТУ в г. Шахты, Российская Федерация, г. Шахты.
E-mail: em1004@mail.ru

Lozovik Ekaterina Georgievna

Senior lecturer at Department of Informatics of ISOiP (branch) DSTU in Shakhty, Russian Federation, Shakhty.

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ОТРЕЗКОВ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ СУБПОЛОСНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

© 2025 Коржавых В.В., Жиляков Е.Г.

В данной статье представлен подход к декомпозиции временных рядов потребления электроэнергии с использованием субполосных представлений. Исследование ориентировано на выделение квазипериодической компоненты и случайных флуктуаций временных рядов, а также на анализ их распределений. Физический фундамент субполосных представлений является важным обоснованием адекватности данного метода, позволяющим учитывать особенности исследуемых временных рядов и эффективно решать задачи выделения системных и остаточных компонент. Исследованы гипотезы о распределениях случайных компонент (нормальное, логнормальное, гамма-распределение и др.), определены погрешности аппроксимации временного ряда с выделенной квазипериодической компонентой и нормально распределенными остатками. Также проведено сравнение результатов декомпозиции с использованием методов экспоненциального сглаживания и k-ближайших соседей. Выявлено, что субполосные представления обеспечивают минимальный уровень автокорреляции остатков при высокой точности декомпозиции. Продемонстрирована эффективность метода на данных бытового и коммерческого сектора потребления электроэнергии.

Ключевые слова: временные ряды потребления электроэнергии, субполосные представления, декомпозиция временного ряда, экспоненциальное сглаживание, k-ближайших соседей, dbscan.

Введение. Обязанность сетевых организаций по установке новых приборов учета, обеспечивающих минимальный набор функций интеллектуальной системы (ИСУ/АИИСКУЭ/АСКУЭ), вступившая в силу 1 января 2022 года согласно [1], открывает возможности для более глубокого анализа процесса потребления электроэнергии.

Структурированные данные, именуемые в подразделениях транспорта и сбыта электроэнергии как профиль потребления, формализованно представляют собой набор векторов $\vec{P} = (p_1 \dots p_N)^T$ и $\vec{Q} = (q_1 \dots q_N)^T$, таких что:

$$\exists K_{ij} : K_{ij} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix}, K_{12} = K_{21} \neq 0,$$

где K_{ij} – корреляционная матрица векторов $\vec{P}$ и $\vec{Q}$, T – символ транспонирования. Вышеуказанные векторы характеризуют зафиксированные в эквидистантных точках с шагом по времени Δt значения активной и реактивной мощности соответственно.

Последовательность наблюдений во времени дискретных отсчетов p_N и q_N , позволяет определить вышеуказанные векторы как временные ряды [2] потребления электрической энергии (далее – ВРПЭ). Важной особенностью таких временных рядов является их квазипериодичность. Соответственно, становятся интересными методики декомпозиции ВРПЭ на системные и случайные компоненты. Для системных компонент интерес представляет выявление возможных, неочевидных на первый взгляд закономерностей, а для случайных – анализ их соответствия известным законам распределения. Причем, ввиду влияния на потребление электроэнергии множества факторов, изменчивость системной компоненты может существенно варьироваться на различных временных интервалах.

Следовательно, необходимо использовать адаптивные методы декомпозиции временных рядов, позволяющие получать информацию по конкретным отрезкам ВРПЭ. Так как анализ ВРПЭ широко применяется в сфере электроэнергетики для прогнозирования потребления, обнаружения разладок, построения типовых отраслевых профилей и т.п., то задача адаптивной декомпозиции является актуальной. Достаточно часто в этих целях используется представление из [3].

Для некоторого вектора $\vec{x} = (x_1 \dots x_N)^T, x_k \in \mathbb{R}^N$:

$$\vec{x} = \vec{f} + \vec{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\vec{f}$ – вектор, отражающий тенденцию изменений процесса, а $\vec{\varepsilon}$ – вектор (далее – остатки), отражающий флуктуации вокруг $\vec{f}$. Выражение (1) представляет собой аддитивную модель разложения временного ряда. Очевидно, что при выделении $\vec{f}$, $\vec{\varepsilon}$ может быть найден как:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{x} - \vec{f}. \quad (2)$$

В настоящее время разложение (1) реализуют такие известные алгоритмы как STL decomposition (англ., seasonal trend decomposition based on locally estimated scatterplot smoothing) или например, seasonal_decompose из библиотеки statsmodels python. Стоит отметить, что вектор $\vec{f}$ для данных алгоритмов будет содержать в себе долгосрочную тенденцию изменений временного ряда и некоторую заранее определенную сезонность. Но seasonal_decompose требует от временного ряда строгой и постоянной периодичности, что не является адекватным представлением ВРПЭ, а также некорректно извлекает сезонность на отрезках менее двух суток. STL decomposition, ввиду использования LOESS позволяет адаптивно определить сезонность, но требует существенных вычислительных ресурсов. Так при сравнении скорости вычислений при декомпозиции ВРПЭ с $N=1440$ и $\Delta t=60$ с, что соответствует одним суткам, STL decomposition оказался медленнее seasonal_decompose в 40 раз.

Из методов, предъявляемых к поведению вектора $\vec{f}$ менее жесткие требования, можно выделить ETS (англ., Exponential time smoothing) [4] или метод k-nearest neighbors regression (далее – KNN), в основе которого лежит процедура вычисления среднего значения целевой переменной f_n для k ближайших соседей, найденных в пространстве признаков. Однако, в данном исследовании использованы оптимальные методы субполосного анализа временных рядов, развитые в [5] ввиду их физической обоснованности. Вышеуказанные методы предлагаются для сравнения полученных результатов декомпозиции ВРПЭ в части скорости вычислений и качества аппроксимации остатков.

Таким образом, становится возможным определение цели и задачи данного исследования: подготовить ВРПЭ для исследования, выделить вектор $\vec{f}$ и остатки по формуле (2) на основе субполосных представлений, сравнить результаты с декомпозицией методами экспоненциального сглаживания и KNN, определить степень близости остатков с известными законами распределения, аппроксимировать ВРПЭ с помощью $\vec{f}$ и выравненными относительно наиболее близкого закона распределения остатками, определить относительную ошибку моделирования для такого ВРПЭ.

Выделение $\vec{f}$. Ввиду квазипериодичности ВРПЭ имеет смысл представление $\vec{x}$ в частотной области при помощи:

$$F(\omega) = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i\omega(k-1)}, i^2 = -1, \quad (3)$$

где ω – нормированная круговая частота. Применяя формулу Эйлера, получим эквивалентное соотношение:

$$F(\omega) = \sum_{k=1}^N x_k (\cos \omega(k-1) - i \sin \omega(k-1)).$$

Соотношение (3) принято называть преобразованием Фурье, а результат суммирования – трансформантой Фурье для дискретных данных. Причем $F(\omega) = F(\omega + 2\pi m), m \in \mathbb{N}_0$:

$$F(\omega + 2\pi m) = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i(k-1)(\omega+2\pi m)} = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i\omega(k-1)} [e^{-2\pi m i(k-1)}].$$

Выражение в квадратных скобках является ничем иным как поворотом единичного вектора по часовой стрелке на 2π . Таким образом трансформанта Фурье для дискретных данных является периодической. Частным случаем преобразования (3) является дискретное преобразование Фурье (ДПФ), вычисляющее спектр в эквидистантных N точках временного ряда. Более общее (3) позволяет вычислять спектр на произвольном количестве точек частотной оси. Условимся далее рассматривать трансформанту Фурье на следующем интервале изменений нормированной круговой частоты:

$$0 \leq \omega \leq \pi. \quad (4)$$

Дуальным к (3) является преобразование:

$$x_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi F(\omega) e^{i\omega(k-1)} d\omega. \quad (5)$$

Рассмотрим сумму $\sum_{k=1}^N x_k^2$, которая в физическом смысле является средней плотностью мощности за период, подставляя в нее (5) и принимая во внимание алгебраическое соотношение:

$$zz^* = (a + ib)(a - ib) = a^2 + b^2,$$

после несложных преобразований:

$$\sum_{k=1}^N x_k^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi |F(\omega)|^2 d\omega. \quad (3)$$

Соотношение (6), являющееся равенством Персиваля, на интервале (4) описывает распределение энергии, высокая концентрация которой в некоторых точках частотной области может свидетельствовать о наличии квазипериодической компоненты исходного вектора $\vec{x}$. Это обстоятельство является важным физическим обоснованием адекватности использования преобразований Фурье (частотных представлений) при декомпозиции ВРПЭ. Другие преобразования носят скорее формальный характер [6].

Выделить данную компоненту возможно, разбив частотную область на r непересекающихся интервалов (субполос), представленных следующим объединением (7):

$$V_R = \bigcup_{r \in R} V_r = \{\omega | \exists r \in R, \omega \in V_r\}, \quad (7)$$

где $V_r = [V_0, V_1] \cup (V_1, V_2] \cup \dots \cup (V_{r-1}, V_r] = \Delta_1 \cup \Delta_2 \cup \dots \cup \Delta_r$, R – множество индексов.

Тогда часть энергии, попадающая в частотный интервал (4):

$$S_r = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega \in \Delta_r} |F(\omega)|^2 d\omega. \quad (8)$$

Для наглядности проиллюстрируем данный процесс (рис. 1):

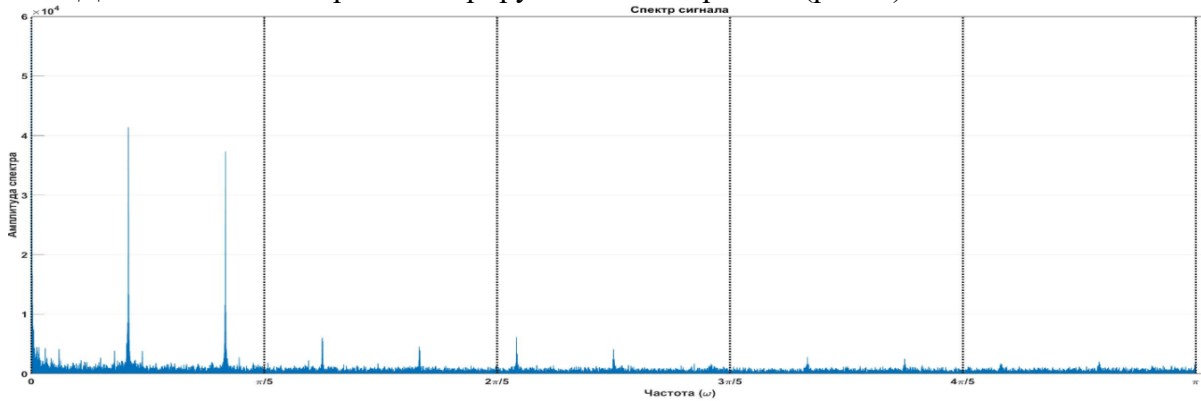


Рис. 1. Пример разбиения частотной оси на субполосы $V_5 \in [0, \pi]$

Из рисунка видно, что наибольшая концентрация энергии спектра сосредоточена на интервале $0 \leq \Delta_1 \leq \frac{\pi}{5}$. Однако, для вычисления долей энергии не обязательно вычислять спектр временного ряда. В [5] показано, что для характеристики (8) справедливо представление в виде квадратичной формы:

$$S_r = (x_1 \dots x_k) \begin{pmatrix} a_{11}^r & \dots & a_{1k}^r \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{j1}^r & \dots & a_{jk}^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_k \end{pmatrix} = \vec{x}^T \mathbf{A}_r \vec{x},$$

где $j, k = 1 \dots N$, $\mathbf{A}_r$ – субполосная матрицы, a_{jk}^r – ее элементы, причем:

$$a_{jk}^r = \frac{\sin(V_r(j-k)) - \sin(V_{r-1}(j-k))}{\pi(j-k)}, a_{ij}^r = \frac{V_r - V_{r-1}}{\pi},$$

а полная энергия, попадающая в выбранный частотный интервал, вычисляется:

$$S_R = \sum_{r=1}^R S_r.$$

Очевидно, что:

$$\mathbf{A}_R = \sum_{r=1}^R \mathbf{A}_r,$$

где $\mathbf{A}_R = \mathbf{A}_R^T$, $\vec{x}^T \mathbf{A}_R \vec{x} \geq 0 \forall x \in \mathbb{R}^N, x \neq 0$.

В этом случае [7] найдется ортогональная $N \times N$ матрица собственных векторов $\mathbf{G} = (\vec{g}_1 \dots \vec{g}_N)$, такая что:

$$\mathbf{G}^T \mathbf{G} = \mathbf{G} \mathbf{G}^T = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \text{diag}(1 \dots 1), \quad (9)$$

и соответствующая диагональная матрица собственных чисел:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_N \end{pmatrix} = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_N),$$

причем:

$$\lambda_N \geq \lambda_{N-1} \geq \dots \lambda_1 \geq 0.$$

Соответственно, справедливо спектральное разложение матрицы $\mathbf{A}_R$:

$$\mathbf{A}_R = \mathbf{G} \mathbf{A} \mathbf{G}^T.$$

Перейдем к новому базису $\vec{x} = \mathbf{G} \vec{c}$, $\vec{c} = \mathbf{G}^T \vec{x}$, $\vec{c} = (c_1 \dots c_N)^T$:

$$S_R = (\mathbf{G} \vec{c})^T \mathbf{G} \mathbf{A} \mathbf{G}^T \mathbf{G} \vec{c}.$$

С учетом (9):

$$S_R = \vec{c}^T \mathbf{A} \vec{c} = \sum_{r=1}^R \lambda_r (\mathbf{G}^T \vec{x})^2.$$

После определения свойства двойной ортогональности трансформант Фурье собственных векторов в [5] становится возможным констатировать, что собственные числа равны долям энергии собственных векторов, попадающим в выбранный частотный интервал. Тогда выбрав собственные векторы, такие что $\lambda_r \geq J$ (в рамках исследования $J \geq 10^{-5}$) получим формулу для выделения $\vec{f}$ из временного ряда:

$$\vec{f} = \mathbf{H} \mathbf{H}^T \vec{x},$$

где $\mathbf{H} = (\vec{g}_1 \dots \vec{g}_J)$.

Остается вопрос о выборе ширины частотного интервала. На основе [5, с. 56] в рамках данного исследования выбран интервал, определяемый следующим неравенством:

$$V_r - V_{r-1} = \frac{5\pi}{N}.$$

Рассмотрение теоретических законов распределения $\vec{\varepsilon}$. После выполнения операции (2) разумно рассуждать о $\vec{\varepsilon}$ в терминах математической статистики. Так как остатки являются результатом регистрации во времени параметров $\vec{P}$ и $\vec{Q}$, то каждое p_k или q_k можно представить как независимый опыт определения значения ε_k , $k \in \mathbb{N}_0$. Совокупность таких наблюдений представляет собой статистический материал, подлежащий анализу и называемый “простой статистической совокупностью”.

Если разделить весь диапазон наблюдений на i интервалов и подсчитать количество значений m_i на каждый i – й интервал и найти частоту p_i^* (10), то сведя полученные данные в таблицу 1, получим статистический ряд [8].

$$p_i^* = \frac{m_i}{n}, \sum_{i=1}^m p_i^* = 1, \quad (10)$$

где n – количество наблюдений.

Таблица 1. Статистический ряд распределения

Интервал	$I_1 - I_2$	$I_2 - I_3$	...	$I_i - I_{i+1}$	$I_k - I_{k+1}$
m	m_1	m_2	...	m_i	m_k
p^*	p_1^*	p_2^*	...	p_i^*	p_k^*

Практика показывает, что рационально выбирать порядка 10-20 чисел интервалов ряда. Для удобства статистический ряд оформляют в виде гистограммы. Статистическое распределение обладает рядом числовых характеристик, необходимых при его анализе. Причем, при неограниченном увеличении числа опытов статистические характеристики сходятся по вероятности к числовым характеристикам случайных величин. Для удобства эти статистические аналогии обозначены теми же буквами что и характеристики случайных величин, но со значком * [8]. Тогда статистическая аналогия математического ожидания (далее – выборочное среднее):

$$M^*[\varepsilon] = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} = m_\varepsilon^*. \quad (11)$$

Аналогично определяются начальные и центральные моменты порядка s :

$$\alpha_s^* = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^s}{n},$$

$$\mu_s^* = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - m_\varepsilon^*)^s}{n}.$$

Ясно, что (11) является начальным моментом порядка 1. Наибольший интерес представляют центральные моменты порядка 2,3 и 4, именуемые дисперсией, асимметрией и эксцессом соответственно. Известно, что корень из дисперсии есть среднеквадратичное отклонение. Далее для удобства обозначим $\sqrt{\mu_2^*} = \sigma$.

Одной из задач математической статистики, применяемой в данном исследовании, является проверка правдоподобия гипотез. Гипотезой H_0 примем следующее утверждение – соответствие распределения $\vec{\varepsilon}$ теоретическому распределению $w(x)$. В качестве теоретических, рассмотрим 5 следующих известных законов распределения:

1. Нормальный закон распределения:

$$w_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu_2^*}} \exp\left(-\frac{(x - m_\varepsilon^*)^2}{2\mu_2^*}\right), \quad (12)$$

где μ_2^* - дисперсия.

2. Логнормальное распределение:

$$w_2(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\mu_2^*}} \exp\left(\frac{-(\ln(x) - m_\varepsilon^*)^2}{2\mu_2^*}\right). \quad (13)$$

3. Гамма распределение:

$$w_3(x) = \frac{x^{k-1} \exp\left(\frac{-x}{\Theta}\right)}{\Theta^k \Gamma(k)}, \quad (14)$$

где k – параметр формы, при $k \rightarrow \infty, w_3(x) \rightarrow (12)$, Θ – параметр масштаба, растягивающий или сужающий распределение, $\Gamma(k)$ – гамма-функция, обобщающая факториал.

4. Экспоненциальное распределение:

$$w_4(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \frac{1}{\lambda} = \alpha_1^*, \frac{1}{\lambda^2} = \mu_2^*. \quad (15)$$

5. Бета распределение:

$$w_5(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, x \in [0, 1], \quad (16)$$

где α, β – параметры формы, характеризующие поведение x вблизи 0 и 1 соответственно, $B(\alpha, \beta)$ – бета функция.

Мерой согласованности между теоретическим и статистическими распределениями в данном исследовании принят χ^2 Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (17)$$

где p_i – вероятность i -го разряда теоретического распределения.

Выражение (17) зависит от параметра r , называемого числом степеней свободы. Он вычисляется как разность числа разрядов k минус число независимых связей, наложенных на частоты p_i^* [8]. Интерпретировать значения χ^2 удобно через p-value – количественную оценку согласованности данных с гипотезой H_0 . Для этого необходимо выбрать порог значимости $\hat{\alpha}$ (использован 0,05). При p-value $\leq \hat{\alpha}$, H_0 отвергается.

Подготовка данных. Исходные данные возможно получить из SCADA - системы мониторинга объектов электроэнергетики, таких как воздушные линии, подстанции, коммутационные аппараты и т.п. объекты различных классов напряжения. Для целей настоящего исследования выбраны данные, получаемые с комплектных трансформаторных подстанций класса напряжения 0,4/10 кВ (далее – КТП 10/0,4 кВ). Система позволяет выгрузить сигналы с различной частотой дискретизации. Опираясь на [3], выбран минимальный интервал, равный 60с. Объем выборки N составляет 4320 отсчетов, что эквивалентно наблюдениям за 3-е суток. КТП 10/0,4 кВ отобраны таким образом, чтобы от них питались либо только бытовые потребители, физические лица, либо единичные не бытовые потребители (торговый центр в исследовании).

Важнейшим этапом перед аналитической работой с временными рядами является подготовка исходных данных, частью которой является обработка единичных выбросов, которые возможно определить как значения, существенно отличающиеся от общих тенденций временного ряда. Далее будет показано, как обработка единичных выбросов улучшает приближение статистического распределения $\vec{\varepsilon}$ к нормальному. Однако, важным аспектом является то, что далеко не для каждого ВРПЭ единичные выбросы являются “вредными” отклонениями, ухудшающими модель. Для некоторых классов потребителей электроэнергии структура потребления с многократными выбросами является нормальной. Например, рассмотрим два графика ВРПЭ, имеющие единичные выбросы данных потребления электроэнергии торговым центром (рис. 2) и рыбохозяйственным предприятием (рис. 3).

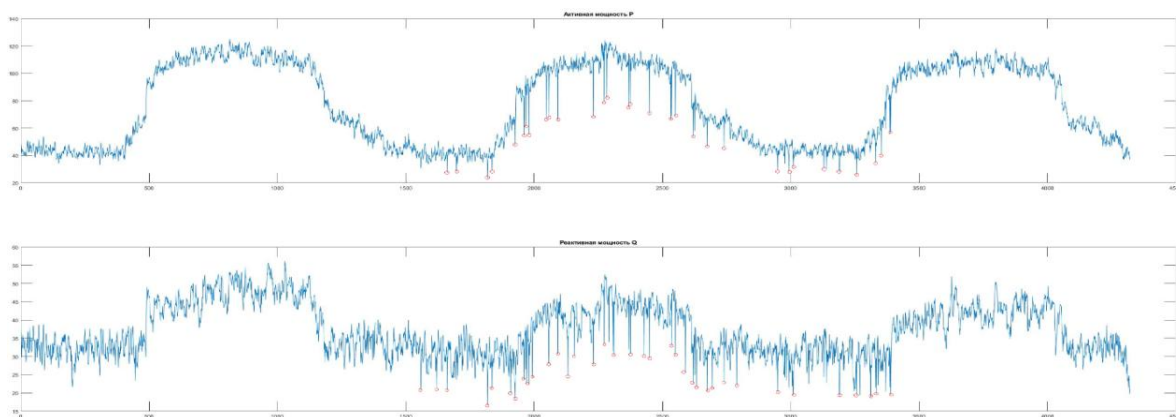


Рис. 2. ВРПЭ торговым центром, 3-е суток, минутный интервал

График имеет четкую квазипериодическую компоненту $\vec{f}$ со случайными колебаниями $\vec{\varepsilon}$ вокруг нее. Отмеченные точки здесь – не регулярные единичные выбросы неизвестной природы, очистка от которых не приведет к изменению структуры потребления электроэнергии.

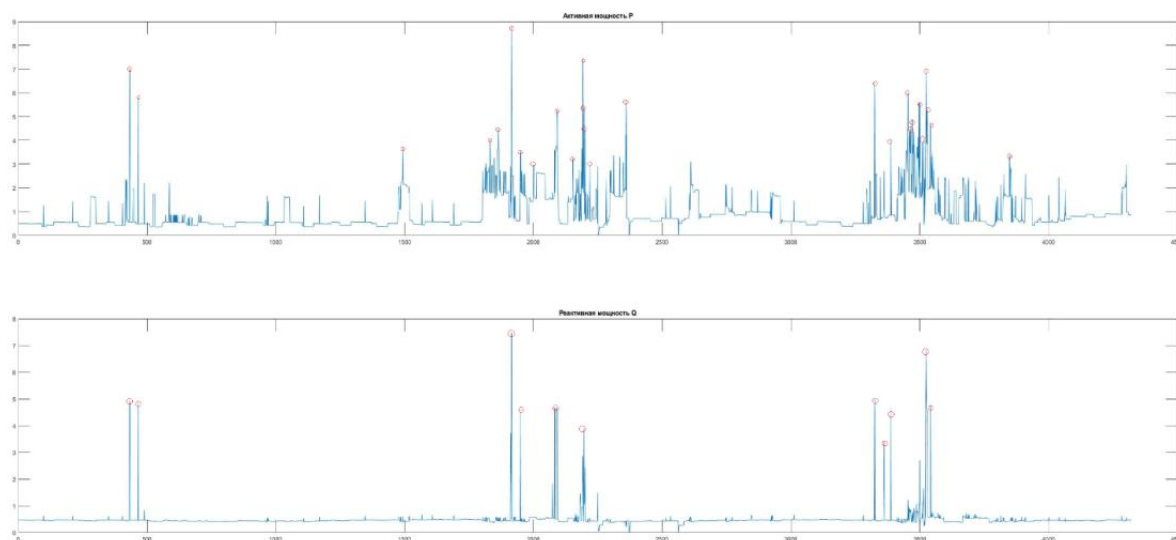


Рис. 3. ВРПЭ рыбохоз предприятие, 3-е суток, минутный интервал

Во втором случае, в связи с некоторой долей стохастичности взятия активной нагрузки, при очистке временного ряда от выбросов серьезно измениться структура потребления, что сделает процесс моделирования неадекватным. Таким образом, подготовка данных посредством очистки от единичных выбросов требует сугубо индивидуального подхода.

В качестве алгоритма, реализующего очистку данных от выбросов, был выбран эвристический метод кластеризации DBSCAN [9]. Результат его работы адекватен в сравнении с эмпирической разметкой данных на примере торгового центра (рис. 4). Недостатком классического алгоритма является ручная настройка радиуса окрестности точки и минимального числа точек в радиусе (epsilon, minPts), но в настоящее время есть решения, автоматизирующие данный процесс [10, 11].

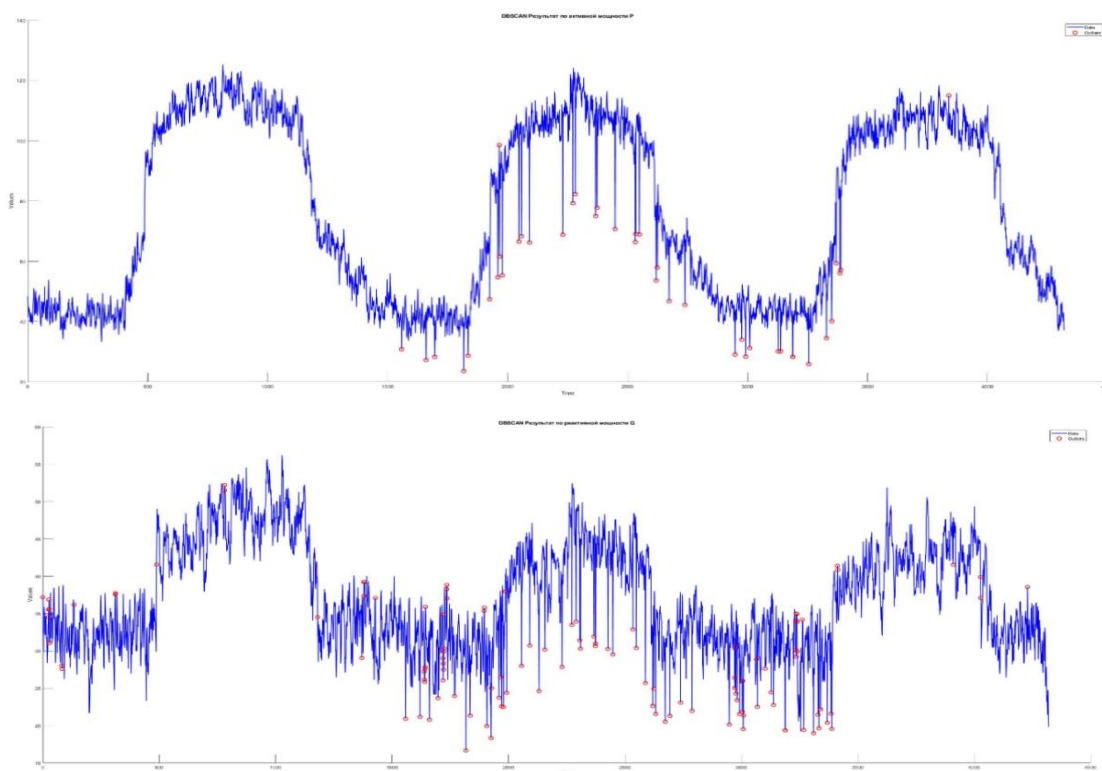


Рис. 4. Результат работы DBSCAN для ВРПЭ торгового центра

Стоит отметить некоторую избыточность в определении выбросов вектора $\vec{Q}$, в целом, не влияющую на структуру временного ряда реактивной мощности. Что касается пропусков данных, в исследуемых ВРПЭ, то они были минимальны и единичны, поэтому обработаны путем подстановки $t-1$ значения ряда, не прибегая к вычислению автокорреляционной функции и т.п.

Результаты исследования для бытового сектора. Для декомпозиции выбрано 3 КТП 10/0,4 кВ с исключительно бытовой нагрузкой (жилые дома). Частотный интервал от 0 до π разбит на непересекающиеся субполосы шириной в $\frac{\pi}{30}, \frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{10}, \frac{\pi}{5}$. Соответствующие интервалы для субполос различной ширины равны Δ_1, Δ_2 и т. п. В таблицах 2-4 определены доли энергии, попадающие в каждый частотный интервал для исследуемых объектов. Ввиду незначительности долей для $\Delta \geq \Delta_5$ вычисления опущены, за исключением последнего индекса:

Таблица 2. Распределение долей энергии по частотным интервалам КТП 10/0,4 кВ №51

Интервал	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_{x0}
$P_{30}, \%$	89,14	2,38	1,12	0,82	0,76	0,08
$Q_{30}, \%$	64,86	13,07	5,91	3,00	2,10	0,21
$P_{20}, \%$	90,63	2,01	1,24	0,97	0,84	0,14
$Q_{20}, \%$	74,01	9,83	4,27	2,61041	1,39	0,30
$P_{10}, \%$	92,64	2,21	1,54	1,09	0,66	0,29
$Q_{10}, \%$	83,84	6,88	2,34	1,90	1,33	0,65
$P_5, \%$	94,86	90,72	94,86	90,72	94,86	-
$Q_5, \%$	90,72	4,24	2,63	4,24	2,63	-

Таблица 3. Распределение долей энергии по частотным интервалам КТП 10/0,4 кВ №188

Интервал	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_{x0}
$P_{30}, \%$	85,03	3,49	1,50	0,94	1,12	0,13
$Q_{30}, \%$	66,12	12,04	4,37	3,65	2,64	0,30
$P_{20}, \%$	87,01	3,00	1,55	1,34	0,87	0,20
$Q_{20}, \%$	73,93	8,59	4,93	3	1,15	0,46
$P_{10}, \%$	90,01	2,90	1,74	1,17	1,09	0,44
$Q_{10}, \%$	82,53	7,72	2,22	1,51	1,26	0,92
$P_5, \%$	92,91	2,91	2,02	1,22	0,94	-
$Q_5, \%$	90,24	3,73	2,19	1,94	1,89	-

Таблица 4. Распределение долей энергии по частотным интервалам КТП 10/0,4кВ №554К

Интервал	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_{x0}
$P_{30}, \%$	73,69	5,16	3,19	2,14	1,56	0,23
$Q_{30}, \%$	50,19	14,50	5,23	5,51	2,78	0,482504
$P_{20}, \%$	75,99	6,06	2,95	2,17	2,28	0,35
$Q_{20}, \%$	55,68	14,24	6,83	3,72	2,31	0,69
$P_{10}, \%$	82,04	5,13	3,74	2,49	1,67	0,72
$Q_{10}, \%$	69,92	10,55	4,68	2,85	2,36	1,44
$P_5, \%$	87,17	6,23	2,99	2,11	1,50	-
$Q_5, \%$	80,47	7,53	4,77	3,82	3,41	-

Как видно из таблиц, наибольшая концентрация энергии спектра приходится на интервал Δ_1 , которая соответствует низкочастотным составляющим. Заметно неравномерное распределение энергии $\vec{P}$ и $\vec{Q}$ относительно друг друга, которое нивелируется при расширении субполосы до $\frac{\pi}{5}$. Таким образом, при выделении $\vec{f}$ разумно использовать субполосный интервал Δ_1 . Кривая, скользящая по ВРПЭ, будет тем более гладкой, чем более узким будет интервал Δ_1 . Это продемонстрировано на рис. 5 на примере $\vec{P}$ КТП 10/0,4 кВ №51 для первых 500 отсчетов:

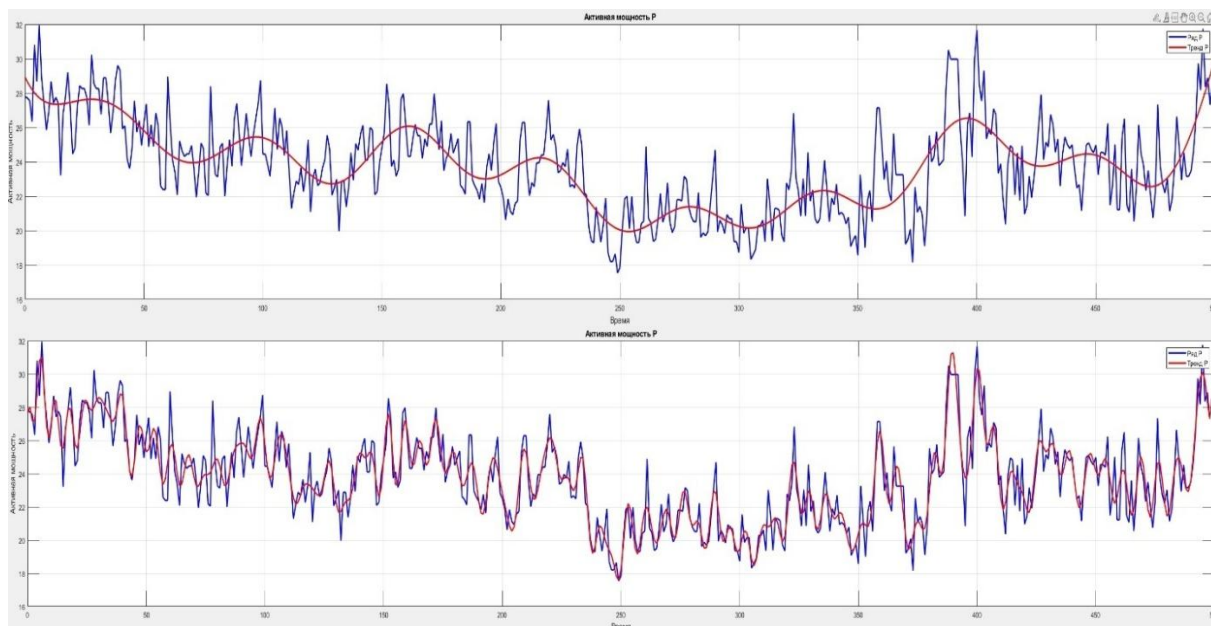


Рис. 5. Выделение вектора $\vec{f}$ на интервале Δ_1 при ширине субполосы $\frac{\pi}{30}$ и $\frac{\pi}{5}$ соответственно

Рассмотрим поведение остатков в контексте их близости к законам распределения (13-16). Для проверки H_0 используем (17). Результаты работы сведены в таблицы 5-7:

Таблица 5. Статистика и результаты проверки гипотезы H_0 по КТП 10/0,4кВ №51

Параметр	m_ε	σ	μ_2	μ_3	max	min
P_{30}	0	2,42	0,38	3,8	14,41	-8,56
Q_{30}	0	0,67	0,17	3,45	7,11	-2,53
P_{20}	0	2,25	0,27	3,3	13,37	-7,13
Q_{20}	0	0,58	0,11	3,69	6,45	-2,25
P_{10}	0	2	0,28	3,36	11	-7,09
Q_{10}	0	0,46	0,23	4,76	5,54	-2,21
P_5	0	1,67	0,24	3,49	7,72	-5,57
Q_5	0	0,35	0,23	6,07	4,22	-2,77
Проверка гипотезы о структуре распределения остатков						
	Нормал.	Логнормал.	Гамма	Экспон.	Бета	-
χ^2, P_{30}	62,21	270,41	86,64	7585	1774	-
p-value P_{30}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{30}	33,46	81,62	96,12	8466	2495	-
p-value Q_{30}	0	0	0	0	0	-
χ^2, P_{20}	63,57	246,57	79,50	6387	1331	-
p-value P_{20}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{20}	13,96	322,01	98,99	9146	2741	-
p-value Q_{20}	0,08	0	0	0	0	-

χ^2, P_{10}	55,55	312,63	112,61	7366	1619	-
p-value P_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{10}	13,32	285,92	121,2	9731	9731	-
p-value Q_{10}	0,05	0	0	0	0	-
χ^2, P_5	64,77	373,89	127,30	13519	1535	-
p-value P_5	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_5	80,37	268,71	114,21	19055	5157	-
p-value Q_5	0,0116	0	0	0	0	-

Таблица 6. Статистика и результаты проверки гипотезы H_0 по КТП 10/0,4кВ №188

Параметр	m_ε	σ	μ_2	μ_3	max	min
P_{30}	0	0,07	0,39	4,13	0,33	-0,25
Q_{30}	0	0,02	-0,05	3,19	0,08	-0,07
P_{20}	0	0,07	0,33	3,96	0,29	-0,24
Q_{20}	0	0,02	0,03	3,18	0,06	-0,06
P_{10}	0	0,06	0,34	3,85	0,27	-0,22
Q_{10}	0	0,01	0,11	3,57	0,07	-0,06
P_5	0	0,05	0,32	3,83	0,25	-0,19
Q_5	0	0,01	0,26	4,61	0,05	-0,05
Проверка гипотезы о структуре распределения остатков						
	Нормал.	Логнормал.	Гамма	Экспон.	Бета	-
χ^2, P_{30}	230,88	351,75	175,19	8156	1947	-
p-value P_{30}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{30}	10,67	405,06	190,09	9923	1848	-
p-value Q_{30}	0,09	0,04	0	0	0	-
χ^2, P_{20}	179,40	376,34	185,27	8501	1972	-
p-value P_{20}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{20}	10,60	340,05	146,09	9405	1483	-
p-value Q_{20}	0,15	0,24	0,24	0	0	-
χ^2, P_{10}	151,19	349,78	166,57	8676	2062	-
p-value P_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{10}	50,8137	369,41	163,50	11660	2439	-
p-value Q_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, P_5	103,18	283,02	125,36	9286	2373	-
p-value P_5	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_5	83,58	158,80	106,19	15344	3666	-
p-value Q_5	0	0	0	0	0	-

Таблица 7. Статистика и результаты проверки гипотезы H_0 по КТП 10/0,4кВ №554К

Параметр	m_ε	σ	μ_2	μ_3	max	min
P_{30}	0	1,93	0,39	4,13	0,33	-0,25
Q_{30}	0	0,41	-0,05	3,19	0,08	-0,07
P_{20}	0	1,83	0,33	3,96	0,29	-0,24
Q_{20}	0	0,38	0,03	3,18	0,06	-0,06
P_{10}	0	1,58	0,34	3,86	0,27	-0,22
Q_{10}	0	0,30	0,11	3,57	0,07	-0,06
P_5	0	1,33	0,32	3,83	0,25	-0,19
Q_5	0	0,24	0,26	4,61	0,05	-0,05
Проверка гипотезы о структуре распределения остатков						
	Нормал.	Логнормал.	Гамма	Экспон.	Бета	-
χ^2, P_{30}	230,81	351,49	175,62	8156	1947	-
p-value P_{30}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{30}	10,19	405,76	190,67	9923	1848	-
p-value Q_{30}	0,11	0	0	0	0	-
χ^2, P_{20}	180,40	376,70	185,62	8501	1972	-
p-value P_{20}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{20}	10,81	340,57	146,62	9405	1483	-
p-value Q_{20}	0,14	0	0	0	0	-
χ^2, P_{10}	149,03	349,21	166,03	8676	2062	-
p-value P_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{10}	52,63	369,24	163,58	11660	2439	-
p-value Q_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, P_5	102,76	283,08	125,98	9286	2376	-
p-value P_5	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_5	83,32	158,98	106,34	15344	3666	-
p-value Q_5	0	0	0	0	0	-

Как видно из таблиц, по трем рассмотренным остаткам ВРПЭ КТП 10/0,4 кВ для активной мощности не подтвердилась ни одна гипотеза о соответствии теоретического распределения, для реактивной мощности, в некоторых частотных интервалах остатки соответствуют нормальному распределению. Однако, при рассмотрении статистики стоит отметить низкое значение коэффициента асимметрии по всем рассматриваемым ВРПЭ ($\mu_3^* \leq 0,5$). Поэтому, в качестве дополнительной проверки составлен следующий ВРПЭ:

$$\vec{P} = \vec{f} + \vec{\varepsilon}_n, \quad (18)$$

где $\vec{\varepsilon}_n$ – вектор, представляющий собой выравненный относительно нормального распределения остаток.

В качестве меры соответствия реального ВРПЭ и смоделированного, использован корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \tilde{p}_i)^2},$$

где p_i – i -й отсчет фактического ВРПЭ, $\tilde{p}_i$ – i -й отсчет смоделированного ВРПЭ.

Относительную ошибку можно вычислить по следующей формуле:

$$E = \frac{2RMSE}{\min(\vec{P}) + \max(\vec{P})}.$$

Данные для полосы, шириной $\frac{\pi}{30}$, представлены в таблице 8:

Таблица 8. Относительная ошибка между фактическим и смоделированными ВРПЭ

Наименование	RMSE	Относительная ошибка, %
КТП 10/0,4 №51	2,98	8
КТП 10/0,4 №188	0,09	11,2
КТП 10/0,4 №554К	2,62	16,8

Таким образом, получены исчерпывающие характеристики для декомпозиции исследуемых трех ВРПЭ бытового сектора. Возможность использования модели (18) будет зависеть от контекста поставленной задачи.

Результаты исследования для коммерческого сектора. Для декомпозиции выбрано одно КТП 10/0,4 кВ, от которого запитан один потребитель – торговый центр. Выполнены мероприятия, аналогичные бытовому сектору, в таблицах 9, 10. В таблице 11 выполнены проверки H_0 с учетом работы алгоритма DBSCAN.

Таблица 9. Распределение долей энергии по частотным интервалам КТП 10/0,4 кВ №204

Интервал	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_{x0}
$P_{30}, \%$	97,73	0,42	0,34	0,17	0,14	0,03
$Q_{30}, \%$	83,33	3,48	3,04	1,32	1,16	0,13
$P_{20}, \%$	98,01	0,49	0,23	0,22	0,14	0,05
$Q_{20}, \%$	85,11	4,74	1,79	1,92	1,34	0,21
$P_{10}, \%$	98,50	0,46	0,22	0,16	0,11	0,09
$Q_{10}, \%$	89,86	3,71	1,94	1,09	0,66	0,44
$P_5, \%$	98,97	0,38	0,22	0,21	0,20	-
$Q_5, \%$	93,58	3,03	1,29	1,15	0,92	-

Таблица 10. Статистика и результаты проверки гипотезы H_0 по КТП 10/0,4кВ №204 без результата работы алгоритма DBSCAN

Параметр	m_ε	σ	μ_2	μ_3	max	min
P_{30}	0	4,20	-2,08	17,74	14,61	-37,57
Q_{30}	0	2,80	-0,76	5,20	8,12	-15,18
P_{20}	0	3,98	-2,24	7,05	15,66	-36,56
Q_{20}	0	2,66	-0,87	5,95	7,99	-16,04
P_{10}	0	3,48	-2,78	26,25	12,82	-35,91
Q_{10}	0	2,20	-1,14	8,31	6,88	-16,43
P_5	0	2,91	-3,31	31,37	13,14	-32,19
Q_5	0	1,75	-1,50	11,48	5,96	-12,93
Проверка гипотезы о структуре распределения остатков						
	Нормал.	Логнормал.	Гамма	Экспон.	Бета	-
χ^2, P_{30}	280,27	2654	1044	29146	6925	-
p-value P_{30}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{30}	274,66	1260	443	14647	1848	-
p-value Q_{30}	0	0,04	0	0	0	-
χ^2, P_{20}	206,70	2630	996	28431	7211	-
p-value P_{20}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{20}	140,96	1043	490	17248	3700	-
p-value Q_{20}	0	0	0	0	0	-
χ^2, P_{10}	214,66	3419	1322	34941	8406	-
p-value P_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{10}	143,75	1518	526	23140	5200	-
p-value Q_{10}	0	0	0	0	0	-
χ^2, P_5	231	3163	1249	34708	9005	-
p-value P_5	0	0	0	0	0	-
χ^2, Q_5	200	1964	1059	23567	5849	-
p-value Q_5	0	0	0	0	0	-

Таблица 11. Статистика и результаты проверки гипотезы H_0 по КТП 10/0,4кВ №204 с учетом работы алгоритма DBSCAN

Параметр	m_ε	σ	μ_2	μ_3	max	min
P_{30}	0	3,43	-0,06	3,31	14,61	-13,71
Q_{30}	0	2,48	-0,15	2,96	8,12	-10,26
P_{20}	0	3,19	-0,04	5,33	10,93	-12,28
Q_{20}	0	2,31	-0,14	3,12	7,99	-10,63
P_{10}	0	2,66	0,01	3,08	10,14	-9,25
Q_{10}	0	1,83	-0,09	3,31	6,85	-8,02
P_5	0	1,97	0,05	3,28	8,22	-7,70
Q_5	0	1,35	0,10	3,63	5,38	-6,58
Проверка гипотезы о структуре распределения остатков						
	Нормал.	Логнормал.	Гамма	Экспон.	Бета	-
χ^2, P_{30}	14,01	583	286	8982	2175	-
p-value P_{30}	0,01	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{30}	31,57	450	221	9052	1785	-
p-value Q_{30}	0	0	0	0	0	-
χ^2, P_{20}	9,63	627	299	8478	1668	-
p-value P_{20}	0,14	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{20}	8,89	393	184	10523	2243	-
p-value Q_{20}	0,17	0	0	0	0	-
χ^2, P_{10}	2,7	502	215	7182	1431	-
p-value P_{10}	0,84	0	0	0	0	-
χ^2, Q_{10}	20,76	377	165	10057	2306	-
p-value Q_{10}	0,02	0	0	0	0	-
χ^2, P_5	7,28	428	178	8533	1996	-
p-value P_5	0,2	0	0	0	0	-
χ^2, Q_5	29,71	245	81	11507	2906	-
p-value Q_5	0	0	0	0	0	-

Данные в таблице 9 также демонстрируют максимальную концентрацию энергии в частотном интервале Δ_1 . В следствие очистки от выбросов можно констатировать что, остатки распределены нормально, за исключением $\bar{Q}$ при ширине полосы $\frac{\pi}{5}$. Графики выделения компонент $\vec{f}$ и $\vec{e}$ представлены на рис. 6, 7 соответственно.

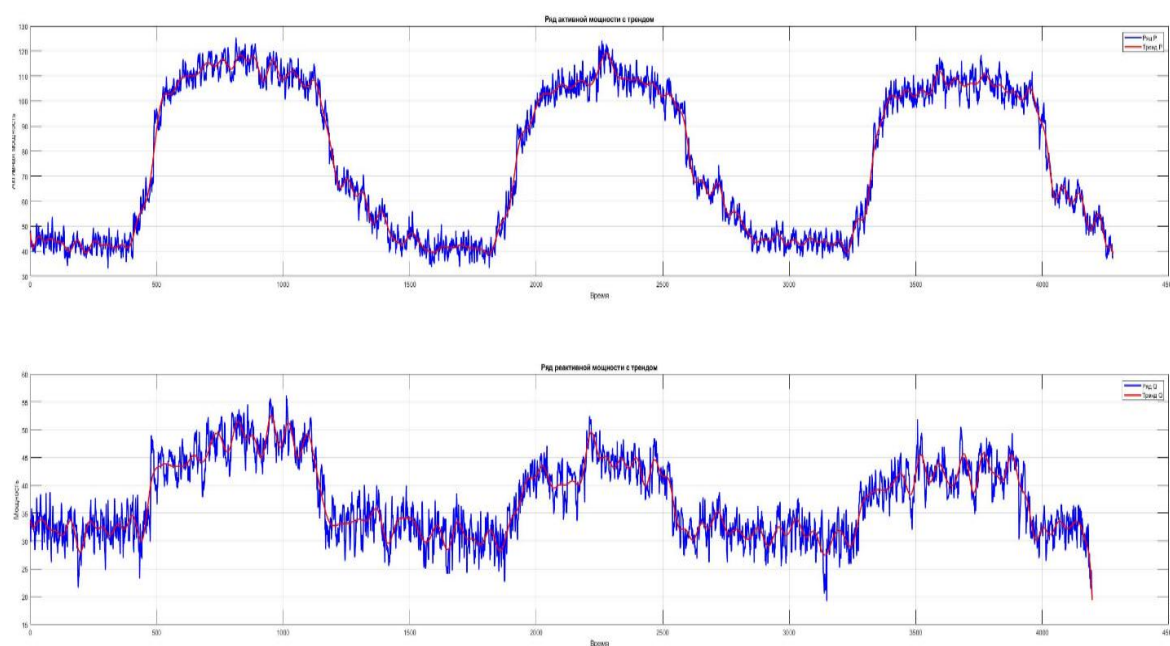


Рис. 6. Выделение вектора $\vec{f}$ на интервале A_1 при ширине субполосы $\frac{\pi}{5}$

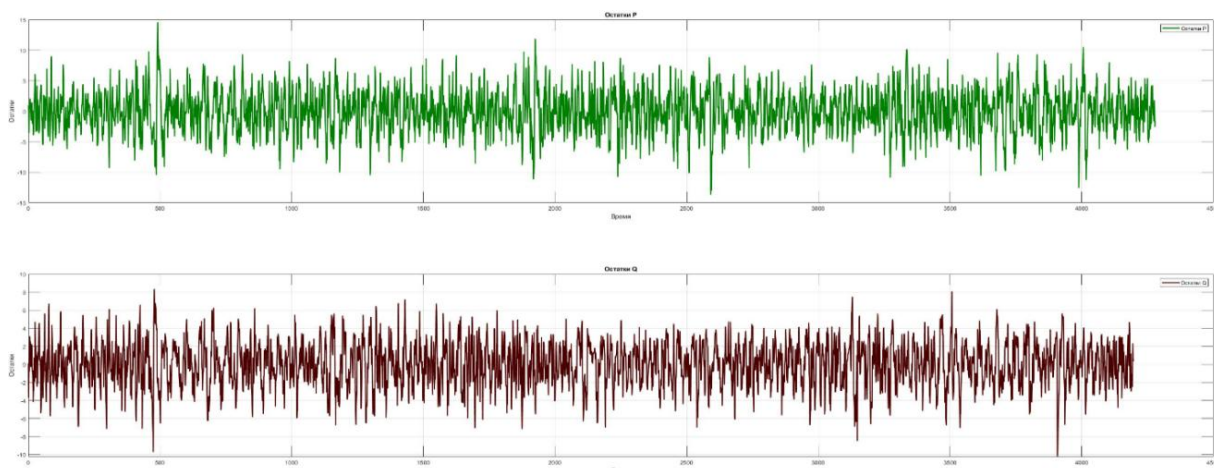


Рис. 7. Выделение вектора $\vec{\varepsilon}$ на интервале A_1 при ширине субполосы $\frac{\pi}{5}$

Сравнение методик выделения $\vec{f}$. Метод, используемый для сравнений алгоритмов экспоненциального сглаживания, KNN и субполосных представлений представляется собой минимизацию квадрата ошибки между вектором $\vec{f}$, полученным с помощью субполосных представлений и сравниваемыми алгоритмами. Соответственно, для экспоненциального сглаживания подбирается коэффициент сглаживания, а в KNN – число соседей. После выделения $\vec{f}$ производится анализ остатков на автокорреляцию. Временной ряд – 500 отсчётов активной мощности КТП 10/0,4кВ №204. Результаты сравнения представлены на рис. 8, 9 соответственно:

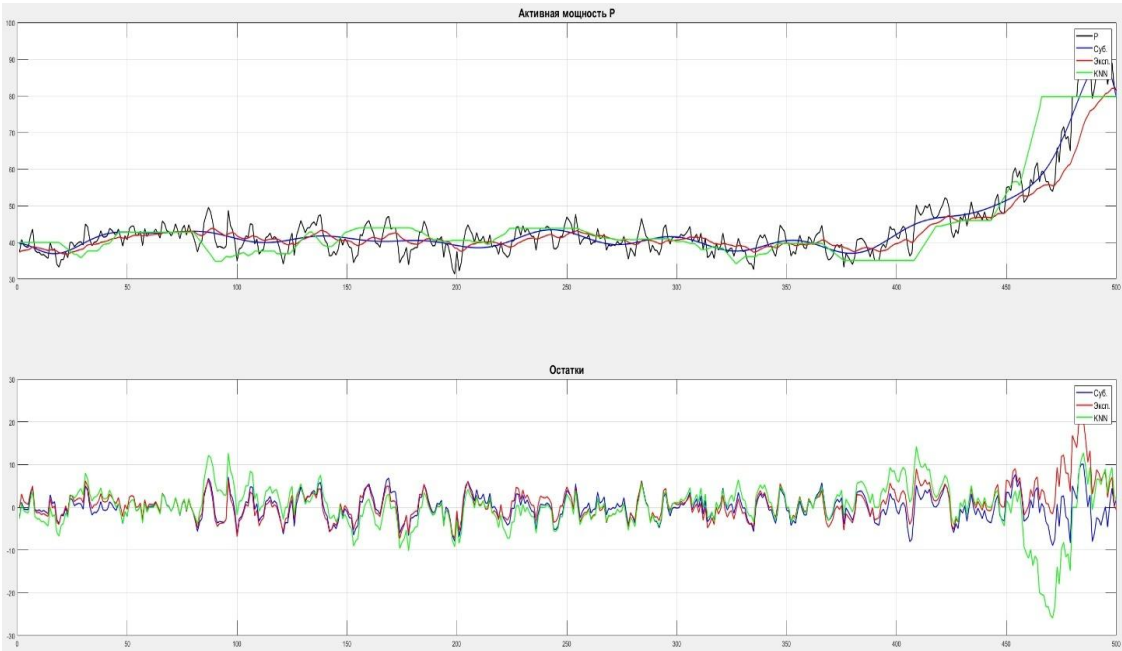


Рис. 8. Сравнение методик выделения $\vec{f}$

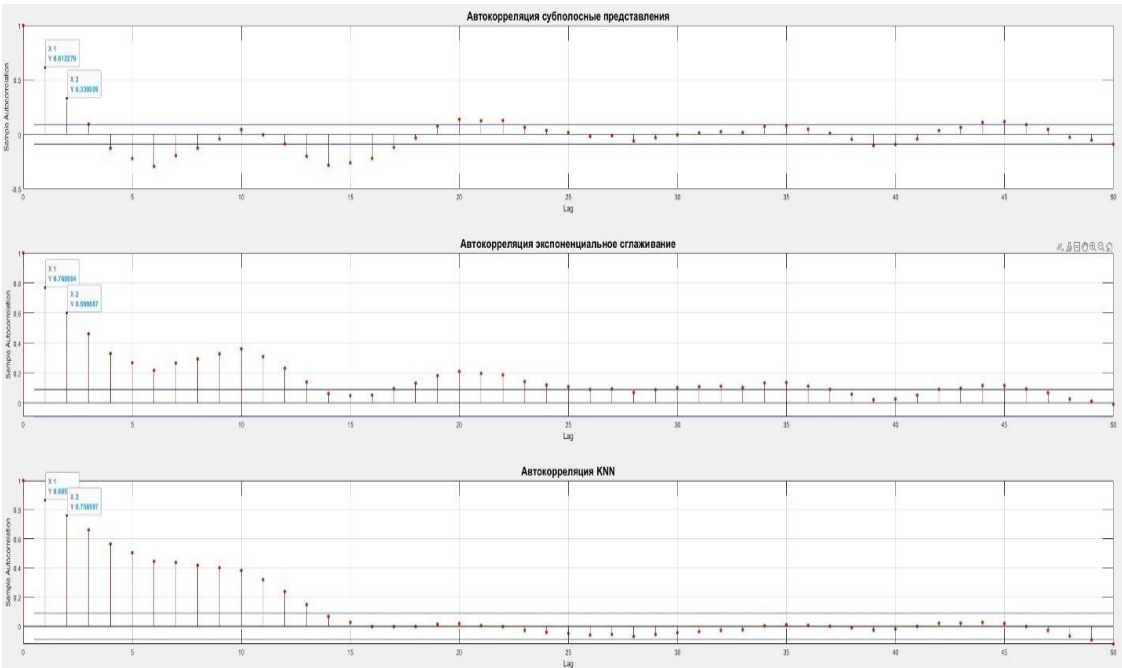


Рис. 9. Автокорреляция остатков

Таким образом, стоит отметить, что остатки, выделенные с помощью субполосных представлений, демонстрируют наименьший уровень автокорреляции. По скорости вычислений методы демонстрируют следующие результаты:

Таблица 12. Сравнение скорости выделения $\vec{f}$

Алгоритм	Субполосные предст.	Экспоненциальное сглаж.	KNN
Время вычисления, с	0,0067	0,0001	0,0097

Однако стоит отметить, что субполосные представления могут конкурировать с приведенными алгоритмами во ВРПЭ с $N \leq 1440$. Далее, в виду $O(n^3)$ для вычисления функции eig в MATLAB, время существенно увеличивается.

Выводы. Проведена декомпозиция ВРПЭ для бытового и коммерческого сектора. С помощью субполосного метода выделена квазипериодическая компонента, вычислена случайная компонента. Показано в каких частотных интервалах сосредоточены максимальные доли энергии ВРПЭ. Проверены гипотезы соответствия случайной компоненты теоретическим законам распределения. Смоделированы ВРПЭ с нормально распределенной случайной компонентой для бытового сектора, вычислены относительные ошибки моделирования. Показано, что при очистке от выбросов, на примере потребления торгового центра, случайная компонента является нормально распределенной. Произведено сравнение автокорреляции остатков, выделенных с помощью субполосных представлений, экспоненциального сглаживания и KNN. Произведено сравнение скорости вычислений в данных алгоритмах. Наименьшую автокорреляцию показали остатки, выделенные с помощью субполосных представлений, разница в скоростях вычислений для $N \leq 1440$ не является существенной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации: Федеральный закон №522-ФЗ от 27.12.2018: [принят Государственной думой 19 декабря 2018 года: одобрен Советом Федерации 21 декабря 2018 года]. – Москва: Кремль, 2018.
2. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. М. Дженкинс. Г. М.: Мир, 1974. – 406 с.
3. Жилияков, Е. Г. Построение трендов отрезков временных рядов / Е. Г. Жилияков // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 3. – С. 80-95. – EDN YJTIYP.
4. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. OTexts / R. J. Hyndman, G. Athanasopoulos. – 2021. – 442 p. – ISBN 13 978-0-98750713-6.
5. Жилияков, Е. Г. Оптимальные субполосные методы анализа и синтеза сигналов конечной длительности / Е. Г. Жилияков // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 4. – С. 51–66.
6. Жилияков, Е. Г. Анализ и аппроксимация функций по эмпирическим данным на основе субполосных представлений / Е. Г. Жилияков, И. И. Лубков, Е. В. Болгова // Экономика. Информатика. – 2022. – Т. 49, № 4. – С. 833-853. – DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-4-833-853. – EDN FAVCQO.
7. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1967. – 576 с.
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
9. Artificial intelligence-based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives / Y. Himeur, K. Ghanem, A. Alsalemi [et al] // Applied Energy. – 2021. – V. 287. – P. 1-26.
10. Марьясин, О. Ю. Обнаружение аномальных отклонений от типового профиля энергопотребления / О. Ю. Марьясин, А. И. Лукашов, Л. И. Тихомиров // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 8. – С. 108-113. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_8_108. – EDN FCTZFF.
11. Automating DBSCAN via Deep Reinforcement Learning / Z. Ruitong, P. Hao, D. Yingtong [et al] // CIKM '22: Proceedings of the 31st ACM International Conference on Information & Knowledge Management. – 2022. – P. 2620-2630. – DOI <https://doi.org/10.1145/3511808.3557245>.

Поступила в редакцию 22.12.2024 г., рекомендована к печати 20.01.2025 г.

DECOMPOSITION OF TIME SERIES SEGMENTS BASED ON SUBBAND REPRESENTATIONS

Korzhavykh V.V., Zhiliakov E.G.

This paper presents an approach to the decomposition of electricity consumption time series using sub-band representations. The study is focused on the separation of the quasi-periodic component and random fluctuations of time series, as well as on the analysis of their distributions. The physical foundation of sub-band representations is an important justification of the adequacy of this method, which allows taking into account the peculiarities of the investigated time series and effectively solving the problems of trend and residual component extraction. Hypotheses about distributions of random components (normal, lognormal, gamma distribution, etc.) are investigated and their approximation is performed. The results of decomposition using exponential smoothing and k-nearest neighbor methods are also compared. It is found that sub-band representations provide the minimum level of residuals autocorrelation with high decomposition accuracy. The efficiency of the method is demonstrated using data from the residential and commercial electricity consumption sectors.

Keywords: power consumption time series, sub-band representations, time series decomposition, exponential smoothing, k -nearest neighbors, dbscan.

Коржавых Владислав Валерьевич

аспирант, заместитель начальника Валуйского района электрических сетей по реализации услуг, Российская Федерация, Белгородская обл., г. Валуйки
E - mail: Korzhavykh.VV@mrsk-1.ru

Korzhavykh Vladislav Valerevich

Postgraduate student, Deputy Head of Valuyskiy District of Electric Networks on Realization of Services,
Russian Federation, Belgorod region, Valuiki.

Жиляков Евгений Георгиевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Российская Федерация, г. Белгород
E - mail: zhilyakov@bsuedu.ru

Zhiliakov Evgenii Georgievich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies of Belgorod State National Research University,
Russian Federation, Belgorod

АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД К ТОНКОЙ НАСТРОЙКЕ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕКСТА В SQL

© 2025 Босенко Т.М.

Возможность генерации SQL-запросов на основе естественного языка существенно упрощает доступ к данным для пользователей, не обладающих техническими навыками. Современные методы часто полагаются на большие языковые модели (LLM) с закрытым исходным кодом, такие как ChatGPT, которые имеют ограничения, включая высокую стоимость и непрозрачную архитектуру. В данной работе предложен адаптивный подход к тонкой настройке малых языковых моделей (SLM) для преобразования текста в запросы SQL (Text-to-SQL), адаптированных под диалекты SQLite3 и PostgreSQL. Предложенная модель SQL_DS_100M_ft основывается на открытой архитектуре CodeS, что обеспечивает ее гибкость и доступность. Проведённый анализ показал, что тонкая настройка позволяет значительно улучшить точность генерации SQL-запросов (до 72.2% по метрике EX на тестах BIRD) и адаптивность модели для сложных аналитических задач. Основные преимущества таких моделей заключаются в структурированности генерируемых запросов, снижение затрат на вычислительные ресурсы по сравнению с LLM и открывают новые перспективы по улучшению доступности реляционных баз данных через естественно-языковые интерфейсы.

Ключевые слова: Text-to-SQL, языковая модель, SQL-запросы, контролируемая тонкая настройка, CodeS.

Введение. Языковые модели показали многообещающую производительность при выполнении задачи перевода вопросов на естественном языке в запросы SQL (текст в SQL). Тем не менее, большинство современных методологий опираются на высокопроизводительные, однако проприетарные большие языковые модели (LLM), такие как ChatGPT и GPT-4. Эти модели характеризуются неопределённой архитектурой, потенциальными рисками для конфиденциальности данных, а также значительными затратами на обеспечение вычислительной инфраструктуры, необходимой для поддержки многопользовательского доступа к системе [1]. Задача преобразования текста в SQL включает в себя перевод вопроса пользователя на естественном языке (NL) в соответствующий и допустимый запрос на языке структурированного запроса (SQL), который может быть выполнен с использованием запроса в соответствующую базу данных. Чтобы устранить перечисленные ограничения, был проведена тонкая настройка малой языковой модели (SLM) SQL_DS_100M_ft.

SQL_DS_100M_ft – это языковая модель размером в 100 миллионов параметров, предназначенная для решения задач Text-to-SQL (генерация SQL-запросов из текста) и прошедшая этап тонкой настройки (Fine-Tuning) адаптирована для использования в контексте ограниченного набора данных в определённой предметной области (DS – Data Science или Database System) на основе CodeS [2].

Эта модель предназначена для преобразования текста на естественном языке в SQL-запросы, обучена на синтетических и реальных наборах данных, адаптированных под диалекты SQLite3 и PostgreSQL, предназначена для работы с SQL-запросами. CodeS – это полностью открытая исходная языковая модель, которая достигает превосходной точности при гораздо меньших размерах параметров. По сравнению с решениями LLM text-to-SQL, CodeS имеет следующие преимущества:

- Полностью открытый исходный код LLM. CodeS, созданный на основе StarCoder [3], полностью открыт и доступен пользователям.
- CodeS достигает производительности сопоставимой с LLM почти во всех сложных тестах преобразования текста в SQL, таких как Spider [4] и BIRD [5].
- Малые размеры. CodeS в 10-100 раз меньше существующих LLM, таких как ChatGPT и GPT-4.

В этой работе представлен адаптивный подход к тонкой настройке языковой модели преобразования текста в SQL, адаптированной к определенному контексту. Обучение модели выполнялось на заранее размеченных данных, готовых шаблонах баз данных для продуктовой аналитики с использованием PostgreSQL и SQLite 3.

Задача преобразования текста в SQL. Цель преобразования текста в SQL – сгенерировать запрос SQL (S) на основе вопроса на естественном языке Q и базы данных D , чтобы запрос SQL можно было выполнить для ответа на вопрос:

$$S = \text{Parser}(Q, D),$$

где $S = \text{Parser}()$ предназначен для интерпретации предоставленного Q с помощью D и создания S . D содержит схему базы данных (т. е. таблицы и столбцы) и метаданные базы данных, которые содержат типы столбцов, комментарии, значения столбцов, первичные ключи и связи внешнего ключа.

Пусть дан набор из N языковых моделей $\{M_1, M_2, \dots, M_{N-1}\}$ и вопрос на естественном языке Q . Требуется определить самую слабую модель M_i , которая может точно сгенерировать соответствующий $\text{Parser}(Q, D)$ (S) для Q . Слабой моделью называют модель с низкой способностью генерации SQL-запросов.

Входные данные для Text-to-SQL – это приглашение, которое включает в себя вопрос на естественном языке (NL), сведения о базе данных и соответствующий диалект SQL. Выходные данные – это запрос SQL, который отвечает на поставленный вопрос. Информация о базе данных включает в себя несколько таблиц, каждая из которых имеет имя, столбцы и типы данных для столбцов.

Предварительно обученные языковые модели. Языковые модели, в первую очередь основанные на архитектуре Transformer [6], отлично справляются с задачами понимания и генерации текста. Обычно они проходят начальную фазу предварительного обучения на обширных текстовых данных с использованием целей неконтролируемого обучения (без учителя). Две известные парадигмы неконтролируемого обучения – это «моделирование языка» и «моделирование замаскированного языка». В первом случае такие модели, как GPT [7], LLaMa [8], предсказывают следующее слово из заданного контекста. В моделировании замаскированного языка определенные слова или словосочетания во входных данных случайным образом маскируются, и задача состоит в том, чтобы реконструировать замаскированные сегменты на основе немаскированного контекста. Представителями таких моделей являются предварительно обученные языковые модели, например, BERT [9] и T5 [10].

Контролируемая тонкая настройка (обучение с учителем) и контекстное обучение. Предварительно обученные языковые модели обладают обширными лингвистическими знаниями, однако для решения конкретных задач часто требуются уникальные языковые шаблоны или экспертные знания в предметной области. Для решения такого типа задач, контролируемая тонкая настройка (КТН) включает в себя профильное дообучение языковой модели на маркированных данных специализированной предметной области, при этом за основу берутся результат предварительного обучения, который получается из нового набора данных.

В отличие от KTH, концепция «обучения в контексте» [11] позволяет языковым моделям решать новые задачи, предоставляя соответствующие подсказки во входных данных, без необходимости в KTH. Однако эффективность обучения в контексте в значительной степени зависит от качества подсказок и самой языковой модели.

Разработанная SML SQL_DS_100M основывается на известных бенчмарках Text-to-SQL, таких как Spider, WikiSQL, CoSQL и SParC. Эти наборы данных предоставляют стандартные схемы и соответствующие запросы SQL, которые используются для обучения модели.

SML SQL_DS_100M_ft дополнена набором данных из бенчмарка «Data Scientist БИ», который включает расширенные схемы данных, процедуры, функции и триггеры. Это обеспечивает её более высокую адаптивность к реальным сценариям, связанным с обработкой сложных аналитических запросов. Этот подход позволяет учитывать дополнительные пары данных (вопрос, SQL-ответ), что улучшает качество прогнозируемых запросов в определенной предметной области.

Алгоритм работы модели SQL_DS_100M_ft.

1. Используются наборы данных (Spider [12], WikiSQL[13], CoSQL[14], SParC[15]) для создания обучающей выборки для малой языковой модели SQL_DS_100M.

2. В модель SQL_DS_100M_ft добавляется бенчмарк «Data Scientist БИ», включающий данные реальных схем баз данных, процедуры, функции и триггеры, которые обогащают её тренировочные данные.

3. На первом этапе модели CodeS передаётся пара «Database prompt + вопрос», что позволяет преобразовать вопрос (Q) в SQL (S) через базовый процесс обработки.

4. Настройка параметров KTH CodeS происходит посредством реальных обучающих данных, что приводит к улучшению логического вывода и формированию точного SQL-запроса (S).

В контексте образовательной парадигмы Московского городского педагогического университета была разработана SLM языковая модель, на основе модели CodeS. Наличие аутентичных обучающих данных, структурированных в соответствии со схемами баз данных, позволило осуществить прямую адаптацию параметров модели CodeS, подгоняя их под распределение размеченных примеров, как проиллюстрировано на рисунке 1. Такой подход обеспечивает оптимизацию процесса обучения и повышает точность результатов, достигаемых с помощью модели CodeS.

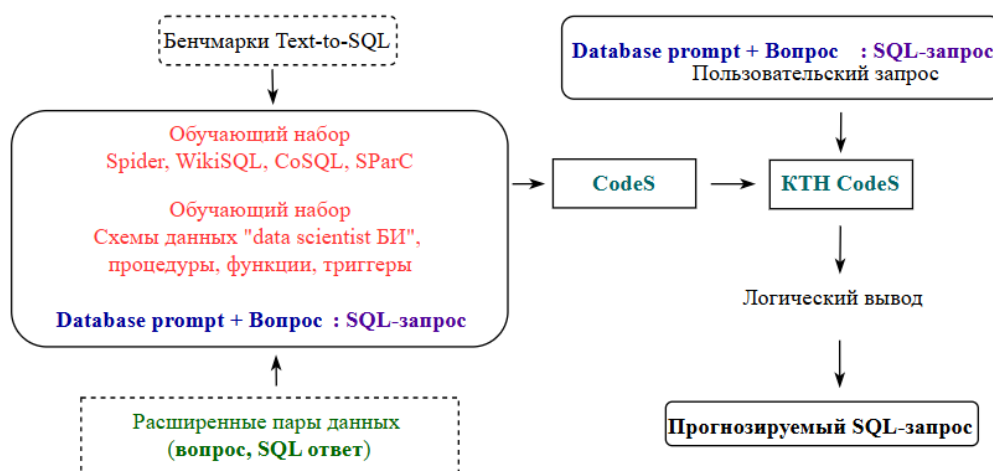


Рис. 1. Контролируемая тонкая настройка CodeS

Метрики оценки. Чтобы оценить эффективность сгенерированного SQL-ответа, используется в качестве основного показателя - точность выполнения (EX). В частности, $EX(S)$ обозначает долю запросов в оценочном наборе S , для которых выходное отношение (из прогнозируемого SQL-запроса) совпадает с отношением истинности. Следовательно, диапазон применимости EX : $0 \leq EX(S) \leq 1$.

Методология. Рассмотрим систему распределения запросов, которая основана на регрессионной модели, с целью оценки вероятности корректной генерации SQL-запроса конкретной моделью M_i для входного запроса Q и принятия решения об использовании модели или отказе от генерации запроса.

Этапы работы модели:

1. Пусть R_α^K – регрессионный маршрутизатор, где (α) – порог вероятности, K – количество похожих запросов, используемых для оценки. Принимает решение о выборе наиболее подходящей модели для обработки входного запроса (Q) на основе исторической информации о похожих запросах и вероятности успешного их выполнения, оптимизируя баланс между точностью, стоимостью и производительностью. Прогнозирует для каждой модели M_i вероятность $P(EX = 1_{M_i} | Q)$, которая определяет способность модели M_i сгенерировать корректный SQL для запроса Q .

2. Маршрутизатор использует порог вероятности (α) для фильтрации моделей. Модель M_i не может сгенерировать запрос, если $P(EX = 1_{M_i} | Q) < \alpha$.

3. Задача маршрутизатора – минимизировать индекс (i) такой, что $P(EX = 1_{M_i} | Q) \geq \alpha$, при этом он выбирает «самую слабую» модель, которая удовлетворяет пороговому значению (α) .

4. Если ни одна из моделей не достигает порогового значения вероятности (α) , то либо запрос не генерируется, либо он направляется к модели, которая обеспечит баланс между точностью и вычислительными затратами. В данной реализации для максимизации точности выбирается «самая сильная» модель.

Механизм оценки и маршрутизации:

1. Для данного запроса (Q) ищем (K) наиболее похожих запросов (Q_k) из исторических данных (H).

2. Для каждой модели (M) вероятность $P(EX = 1_{M_i} | Q)$ задаётся как $EX(Q_k | M_i)$, где $EX(Q_k | M_i)$ – метрика, которая показывает: как модель (M_i) справлялась с похожими запросами (Q_k).

3. Модели фильтруются относительно порогового значения (α) : остаются только те модели, для которых $EX(Q_k | M_i) \geq \alpha$.

4. Из моделей, которые прошли фильтр, выбирается «самая слабая» с минимальным значением $EX(Q_k | M_i)$, которая удовлетворяет пороговому значению (α) , для снижения вычислительной сложности.

Постановка задачи. Общая постановка задачи для выбора оптимальной модели SQL_DS_100M_ft для генерации SQL-запросов на основе обученной модели BERT:

максимизировать $EX(S)$, где S - SQL-запрос, сгенерированный выбранной моделью M_i , при условии, что M_i является самой слабой моделью, способной сгенерировать точный SQL-запрос. Формализация:

$R_{BERT}: (NL, D \text{ схема базы данных}) \rightarrow l$, где $l \in \{1, 2, \dots, n, N\}$

Если $l = i$, где $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, то:

- $EX(Q) = 1_{M_i}$, если модель M_i генерирует точный SQL-запрос для Q
- $M_i = \operatorname{argmin}\{M_j \mid EX(Q) = 1_{M_j}, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$

Если $l = N$, то:

- $EX(Q) = 0$ для всех моделей M_i

Задача оптимизации для поиска языковой модели: максимизировать $EX(S)$ при условии:

- $S = \text{SQL-запрос, сгенерированный моделью } M_i$
- $M_i = \operatorname{argmin}\{M_j \mid EX(Q) = 1_{M_j}, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$

Обучение и оптимизация поиска модели выполнялись с использованием набора данных BIRD [16], который является сложным тестом для Text-to-SQL. Обучающий набор состоял из 1534 запросов в наборе данных, а обучающий набор «Data Scientist БИ», который выступал в качестве (H), состоял из 1890 запросов.

В таблице 1 указаны показатели точности выполнения ($EX\%$) для разных моделей при обработке запросов из набора данных BIRD. В таблице учтены модели различных архитектур, включая SQLCoder-7B-2, text2sql, WPAIGPT-sql-01, две модели SQL_DS_100M и две модели SQL_DS_100M_ft с различными порогами вероятности (α).

Языковая модель SQLCoder-7B-2 остается лидером по точности, но его применение может быть ограничено из-за высоких требований к вычислительным ресурсам.

Таблица 1. Распределение моделей при каждой генерации SQL-запроса

Модель	Архитектура	EX%
SQLCoder-7B-2 [17]	CodeLlama-7B	76.9
text2sql [18]	Google T5 Base	69.8
WPAIGPT-sql-01[19]	Qwen2.5-Coder-7B-Instruct	66.5
$R_{0.6}^{25}(\text{SQL_DS_100M})$ [2]	CodeS	64.8
$R_{0.7}^{38}(\text{SQL_DS_100M})$	CodeS	66.1
$R_{0.6}^{15}(\text{SQL_DS_100M_ft})$	CodeS	71.8
$R_{0.7}^{15}(\text{SQL_DS_100M_ft})$	CodeS	72.2

SLM $R_{0.7}^{15}(\text{SQL_DS_100M_ft})$ представляет собой оптимальный выбор для практических приложений, предлагая высокую точность (72.2%) при значительно меньших вычислительных затратах. Это особенно важно для образовательных целей и анализа данных в экономических и технических областях, где ресурсы могут быть ограничены. Архитектура CodeS в сочетании с тонкой настройкой ($_ft$) демонстрирует конкурентоспособные результаты, что указывает на потенциал данной архитектуры для дальнейшего развития и применения в задачах Text-to-SQL.

Результаты. Рассмотрим, как использование тонкой настройки модели SQL_DS_100M_ft с предметно-ориентированным бенчмарком «Data Scientist БИ» улучшает генерацию SQL-запросов, повышая их точность, структурированность и адаптивность для решения аналитических задач. Сравним результаты стандартной и тонко настроенной модели, проанализируем их производительность по различным категориям запросов и покажем, как адаптация улучшает понимание и применение SQL для пользователей. Пример запроса на естественном языке:

Запрос: Какие продукты и их категории имели среднюю цену за последний год, отсортированные по убыванию средней цены?

Для сравнения представим результат генерации SQL-запросов стандартной моделью SQL_DS_100M и тонко настроенной моделью SQL_DS_100M_ft. На рисунке 2а изображён запрос, созданный базовой моделью SQL_DS_100M, без использования специализированных предметных данных, а на рисунке 2б показан запрос, сгенерированный после контролируемой тонкой настройки модели SQL_DS_100M_ft.

Основные наблюдения:

Без использования тонкой настройки (SQL_DS_100M):

- SQL-запрос представляет собой один монолитный блок, объединяющий фильтр, соединение и группировку данных.
- Такая структура запроса снижает читабельность, особенно для студентов и пользователей с начальным уровнем подготовки.
- Отсутствие разделения логики фильтра и соединения делает запрос менее адаптивным для изменения.

```
SELECT
    p.product_id,
    AVG(p.avg_price) AS
avg_price,
    c.category_name
FROM
    products p
JOIN
    categories c ON
p.category_id = c.category_id
WHERE
    p.most_recent_order_timestamp
>= DATEADD(month, -12,
CURRENT_TIMESTAMP)
GROUP BY
    p.product_id,
    c.category_name
ORDER BY
    avg_price DESC
```

а) Генерация SQL-скрипта без учета контролируемой тонкой настройки. Модель SQL_DS_100M. Диалект SQLite3

```
WITH recent_orders AS (
SELECT
    product_id,
    SUM(quantity) AS total_quantity
FROM
    orders
WHERE
    order_date >= DATEADD(month, -6,
CURRENT_TIMESTAMP)
GROUP BY
    product_id
)
SELECT
    p.product_id,
    p.product_name,
    ro.total_quantity * p.avg_price AS
total_revenue
FROM
    products p
JOIN
    recent_orders ro ON p.product_id =
ro.product_id
ORDER BY
    total_revenue DESC
LIMIT 10;
```

б) Генерация SQL-скрипта с учетом контролируемой тонкой настройки. Модель SQL_DS_100M_ft. Диалект SQLite3

Рис. 2. Сравнение синтаксиса SQL без учета (2а) и с учетом 2(б) тонкой настройки модели SQL_DS_100M_ft

После тонкой настройки (SQL_DS_100M_ft):

- Логика запроса разделена на несколько этапов, представленных в виде Common Table Expressions (CTE).
- Основной запрос группирует и сортирует данные, обеспечивая прозрачность выполнения.

Эта структурированность не только улучшает читабельность, но и позволяет пошагово изучать отдельные элементы запроса, что особенно полезно в образовательных целях. Кроме того, подобный подход упрощает внесение изменений и адаптацию под новые задачи, так как каждое CTE можно модифицировать или использовать повторно.

Выводы. В данной работе представлен адаптивный подход к тонкой настройке языковых моделей для задач преобразования текста в SQL. Основное внимание уделено созданию специализированной SLM SQL_DS_100M_ft, которая демонстрирует значительное улучшение точности и адаптивности за счёт интеграции специализированных данных и методов обучения. Этот подход позволяет преодолеть ограничения крупных языковых моделей, такие как высокая стоимость вычислительных ресурсов и риск потери конфиденциальных данных.

Одним из ключевых аспектов является использование предметно-ориентированного бенчмарка «Data Scientist БИ», который обогащает обучающую выборку реальными схемами баз данных, процедурами, триггерами и функциями. Это позволяет адаптировать модель под специфические задачи аналитики, обеспечивая её гибкость и точность. В результате тонкая настройка модели SQL_DS_100M_ft приводит к улучшению качества прогнозируемых SQL-запросов, особенно для сложных категорий запросов, таких как объединения (join) и сортировка (order_by).

Основные преимущества предложенного подхода:

Высокая точность выполнения: Модель SQL_DS_100M_ft достигает точности 72.2% по метрике EX на сложных тестах (например, BIRD), демонстрируя конкурентоспособность с крупными языковыми моделями при значительно меньших вычислительных затратах.

Адаптивность к задачам аналитики: Использование специализированных данных (бенчмарк «Data Scientist БИ») повышает точность модели в категориях запросов (join, order_by).

Структурированность запросов: Разделение запросов на логические этапы (через CTE) улучшает их читабельность и делает их более подходящими для обучения и модификации.

Эффективность использования ресурсов: По сравнению с крупными моделями, такими как SQLCoder-7B-2, SQL_DS_100M_ft требует значительно меньших вычислительных ресурсов, что делает её доступной для образовательных и практических целей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Haoyang, Li [et al] CodeS: Towards Building Open-source Language Models for Text-to-SQL // Proceedings of the ACM on Management of Data. – 2024. – V. 2, № 3. – 28 p. – DOI <https://doi.org/10.1145/3654930>.
2. Демонстрационная версия преобразования текста в SQL на базе CodeS [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/RUCKBReasoning/text2sql-demo> (дата обращения: 01.02.2024).
3. Raymond, Li [et al] StarCoder: May the source be with you! [Электронный ресурс]. – 2023. – CoRR abs/2305.06161. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.06161> (дата обращения: 12.03.2024).
4. Tao, Yu [et al] Spider: A Large-Scale Human-Labeled Dataset for Complex and Cross-Domain Semantic Parsing and Text-to-SQL Task [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1809.08887> (дата обращения: 12.10.2024).
5. Jinyang, Li [et al] Can LLM Already Serve as A Database Interface? A Big Bench for Large-Scale Database Grounded Text-to-SQLs [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.03111> (дата обращения: 01.10.2024).
6. Vaswani, A. [et al] Attention is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems 30: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2017. – 2017, Long Beach, CA, USA. – 2017. – P. 5998–6008.
7. Radford, A. [et al] Improving language understanding by generative pre-training [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: https://cdn.openai.com/research-covers/language-unsupervised/language_understanding_paper.pdf (дата обращения: 10.11.2024).
8. Touvron, H. [et al] LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models // CoRR abs/2302.13971. – 2023. – URL: <https://arxiv.org/abs/2302.13971> (дата обращения: 12.10.2024).

9. Yin, P. [et al] TaBERT: Pretraining for Joint Understanding of Textual and Tabular Data // Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – 2020. – P. 8413–8426.
10. Raffel, C. [et al] Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer // J. Mach. Learn. Res. – 2020. – V. 21. – P. 140:1–140:67.
11. Wei, J. [et al] Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models [Электронный ресурс] // NeurIPS. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2201.11903> (дата обращения: 15.06.2024).
12. Yu, T. [et al] Spider: A Large-Scale Human-Labeled Dataset for Complex and Cross-Domain Semantic Parsing and Text-to-SQL Task [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1809.08887> (дата обращения: 15.06.2024).
13. Zhong, V. [et al] Seq2SQL: Generating Structured Queries from Natural Language using Reinforcement Learning [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1709.00103> (дата обращения: 12.06.2024).
14. Yu, T. [et al] CoSQL: A Conversational Text-to-SQL Challenge Towards Cross-Domain Natural Language Interfaces to Databases [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1909.05378> (дата обращения: 15.06.2024).
15. Yu, T. [et al] SPaRC: Cross-Domain Semantic Parsing in Context [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1906.02285> (дата обращения: 01.12.2023).
16. Li, J. [et al] Can LLM Already Serve as a Database Interface? A Big Bench for Large-Scale Database Grounded Text-to-SQLs // CoRR. – 2023. – Vol. abs/2305.03111. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.03111> (дата обращения: 11.09.2024).
17. Модель SQLCoder-7B-2. Большая языковая модель для генерации SQL-кода на естественном языке [Электронный ресурс]. – URL: <https://huggingface.co/defog/sqlcoder-7b-2> (дата обращения: 11.09.2024).
18. Леонхардт, Х. Text2SQL (Revision c06880d) [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://huggingface.co/juanfra218/text2sql> (дата обращения: 12.10.2024). – DOI 10.57967/hf/2897.
19. Модель WPAIGPT-sql-01. Большая языковая модель для генерации SQL-кода на естественном языке [Электронный ресурс]. – URL: <https://huggingface.co/WPAI-INC/WPAIGPT-sql-01> (дата обращения: 10.09.2024).

Поступила в редакцию 23.12.2024 г., рекомендована к печати 20.01.2025 г.

ADAPTIVE APPROACH TO FINE-TUNING LANGUAGE MODELS FOR TEXT TO SQL CONVERSION TASKS

Bosenko T.M.

The ability to generate SQL queries based on natural language greatly simplifies data access for non-technical users. Current methods often rely on closed-source large language models (LLMs), such as ChatGPT, which have limitations including high cost and opaque architecture. In this paper, we propose an adaptive approach to fine-tuning small language models (SLMs) for converting text to SQL queries (Text-to-SQL) adapted to the SQLite3 and PostgreSQL dialects. The proposed model, SQL_DS_100M_ft, is based on the open-source CodeS architecture, which ensures its flexibility and accessibility. The analysis showed that fine-tuning can significantly improve the accuracy of SQL query generation (up to 72.2% by the EX-metric on BIRD tests) and the adaptability of the model for complex analytical tasks. The main advantages of such models are the structured nature of the generated queries, reduced costs for computing resources compared to LLM, and open up new prospects for improving the accessibility of relational databases through natural language interfaces.

Keywords: Text-to-SQL, language model, SQL queries, controlled fine-tuning, CodeS processing.

Босенко Тимур Муртазович

кандидат технических наук, доцент департамента информатики, управления и технологий ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: bosenkotm@mgpu.ru

Bosenko Timur Murtazovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Computer Science, Management and Technology of Moscow City University,
Russian Federation, Moscow.

УСТРОЙСТВА NVIDIA СЕРИИ JETSON ДЛЯ РАБОТЫ С НЕЙРОСЕТЯМИ

© 2025 *Васильянов А.И., Бондаренко В.И.*

В статье рассматриваются устройства серии Jetson, разработанные компанией Nvidia, и их применение в задачах, связанных с нейросетевыми вычислениями. Описаны особенности архитектуры Jetson, которая позволяет эффективно выполнять операции, связанные с машинным обучением и искусственным интеллектом, включая обработку изображений, видеоаналитику и распознавание объектов. Приведены примеры использования этих устройств в робототехнике, автономных системах и других областях, требующих высокой вычислительной мощности при низком энергопотреблении. Особое внимание уделено программному обеспечению, поддерживающему работу с платформой Jetson, включая фреймворки для глубокого обучения и инструменты оптимизации нейросетей. Также проанализированы перспективы развития и возможные направления использования устройств серии Jetson в будущем. Рассмотрена их роль в формировании новых технологий и инновационных решений, способных ускорить внедрение искусственного интеллекта в различные сферы деятельности человека.

Ключевые слова: Nvidia Jetson, нейросети, машинное обучение, искусственный интеллект, глубокое обучение.

Введение. В последние годы нейросетевые технологии приобретают всё большее значение в различных областях науки, техники и бизнеса. Применение искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) позволяет решать сложные задачи, требующие анализа огромных объемов данных, автоматизации процессов и создания интеллектуальных систем. Одним из ведущих производителей аппаратного обеспечения для нейросетевых вычислений является компания Nvidia, чьи устройства серии Jetson широко используются в различных отраслях. Эти компактные, но мощные вычислительные платформы обеспечивают высокую производительность при низком энергопотреблении, что делает их идеальными для внедрения в системы с ограниченными ресурсами, такие как роботы, дроны и автономные транспортные средства.

Платформы Nvidia Jetson включают в себя процессоры с архитектурой CUDA, графические процессоры (GPU) и специальные ускорители для выполнения операций, связанных с нейросетями. Они поддерживают работу с популярными фреймворками для глубокого обучения, такими как TensorFlow, PyTorch и Caffe, что делает их универсальными инструментами для разработки и внедрения ИИ-решений. Применение устройств Jetson позволяет значительно ускорить процесс разработки и тестирования нейросетевых моделей, а также повысить их эффективность за счёт оптимизации вычислений [1].

Сегодня устройства серии Jetson находят применение в самых разных сферах — от медицинской диагностики и мониторинга окружающей среды до автоматизации производственных процессов и создания интеллектуальных систем безопасности. В условиях стремительного развития технологий ИИ и МО, платформа Nvidia Jetson играет ключевую роль, предлагая мощные и доступные решения для разработчиков и исследователей. В этом контексте важно не только понимать возможности и особенности устройств Jetson, но и учитывать их потенциал для дальнейшего расширения и интеграции в новые технологические экосистемы.

Устройства серии Nvidia Jetson представляют собой мощные и компактные вычислительные платформы, предназначенные для выполнения задач, связанных с искусственным интеллектом и машинным обучением. Основные компоненты этих устройств обеспечивают их высокую производительность и энергоэффективность, что делает их идеальными для использования в системах с ограниченными ресурсами, таких как роботы и автономные устройства (рис. 1).

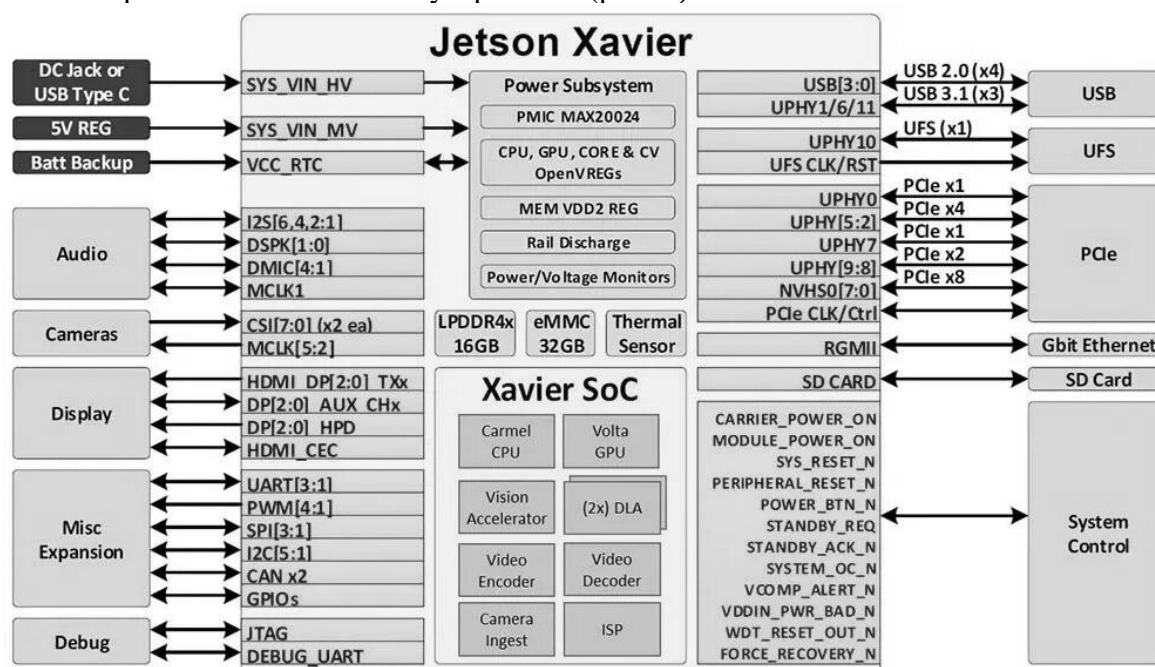


Рис. 1. Архитектура устройств Jetson Xavier

Основные компоненты:

1. **Центральный процессор (CPU):** каждое устройство Jetson оснащено многоядерным центральным процессором, который отвечает за выполнение общих вычислительных задач и управление операционной системой. CPU также координирует работу других компонентов, обеспечивая стабильность и эффективность системы в целом.

2. **Графический процессор (GPU):** графический процессор является ключевым компонентом для работы с нейросетевыми задачами. GPU поддерживает архитектуру CUDA, разработанную Nvidia, которая позволяет значительно ускорить параллельные вычисления, необходимые для обучения и работы глубоких нейронных сетей. Это делает устройства Jetson идеальными для задач, требующих интенсивных вычислений, таких как обработка изображений и видео.

3. **Оперативная память (RAM):** оперативная память в устройствах Jetson используется для хранения данных, которые необходимы процессорам в ходе выполнения задач. Объем и скорость RAM играют важную роль в обеспечении плавной работы нейросетевых алгоритмов, особенно при обработке больших объемов данных в реальном времени.

4. **Хранение данных:** для хранения операционной системы, программного обеспечения и данных устройства Jetson оснащены флеш-памятью или разъемами для внешних накопителей. Объем и скорость хранения влияют на общую производительность системы, особенно при работе с большими наборами данных или сложными моделями нейросетей.

5. Интерфейсы ввода-вывода (I/O): Jetson предлагает широкий набор интерфейсов для подключения различных периферийных устройств, таких как камеры, датчики и сетевые модули. Эти интерфейсы обеспечивают гибкость и возможность интеграции устройств Jetson в разнообразные системы, начиная от робототехнических комплексов и заканчивая умными камерами для мониторинга [2].

Эти компоненты, работая в тандеме, создают мощную и адаптируемую платформу, способную справляться с разнообразными задачами в области искусственного интеллекта и машинного обучения.

Архитектура CUDA. Архитектура CUDA (Compute Unified Device Architecture), разработанная компанией Nvidia, является параллельной вычислительной платформой и программной моделью, которая позволяет использовать графические процессоры (GPU) для выполнения сложных вычислений. CUDA играет ключевую роль в ускорении нейросетевых вычислений, предоставляя разработчикам мощный инструмент для создания и оптимизации моделей машинного и глубокого обучения.

Одним из главных преимуществ архитектуры CUDA является её способность выполнять огромное количество вычислительных задач параллельно. В отличие от центральных процессоров (CPU), которые имеют ограниченное количество ядер и обрабатывают задачи последовательно или с ограниченным параллелизмом, графические процессоры, поддерживающие CUDA, могут иметь тысячи ядер, работающих одновременно. Это особенно важно для нейросетевых вычислений, которые включают обработку больших объемов данных и выполнение множества операций с матрицами, требующих значительных вычислительных ресурсов.

CUDA позволяет использовать специализированные библиотеки, такие как cuDNN (CUDA Deep Neural Network), которые оптимизированы для выполнения операций, часто встречающихся в глубоких нейронных сетях. Это включает в себя свертки, пулинги, нормализацию и другие ключевые операции, необходимые для обучения и инференса моделей. Использование таких библиотек значительно ускоряет процесс разработки и улучшает производительность моделей [3].

Архитектура CUDA поддерживает множество языков программирования, включая C, C++, Python и Fortran, что делает её доступной для широкого круга разработчиков. Кроме того, CUDA интегрируется с популярными фреймворками для машинного обучения, такими как TensorFlow, PyTorch и Keras, что позволяет легко переносить и масштабировать существующие модели на устройства с поддержкой CUDA. Это упрощает разработку и внедрение нейросетевых решений на основе платформы Nvidia Jetson.

CUDA обеспечивает масштабируемость вычислений, что позволяет эффективно использовать ресурсы GPU для различных задач — от простой обработки данных до сложных симуляций и глубокого обучения. Это позволяет использовать одну и ту же архитектуру для разных уровней задач, начиная с разработки моделей на персональных компьютерах и заканчивая их развертыванием на мощных вычислительных кластерах.

Набор инструментов, предоставляемых Nvidia для работы с CUDA, включает отладчики, профайлеры и визуализаторы, которые помогают разработчикам оптимизировать производительность своих приложений. Эти инструменты позволяют детально анализировать поведение нейросетевых моделей и устранять узкие места в вычислениях, что особенно важно при разработке высокопроизводительных ИИ-приложений.

Архитектура CUDA, с её способностью к масштабированию и оптимизации, стала основой для современных нейросетевых вычислений. Она обеспечивает высокую производительность и гибкость, позволяя разработчикам создавать и внедрять эффективные и мощные ИИ-решения на платформах Nvidia Jetson и других устройствах с поддержкой GPU.

Ускорители и графические процессоры. Устройства Nvidia Jetson оснащены графическими процессорами (GPU) и специализированными ускорителями, которые играют ключевую роль в их производительности. GPU в этих устройствах поддерживают архитектуру CUDA, которая позволяет эффективно выполнять параллельные вычисления, необходимые для работы с нейросетями. Благодаря тысячам ядер, GPU может обрабатывать огромные объемы данных одновременно, что значительно ускоряет выполнение задач, связанных с машинным обучением и глубоким обучением [4].

Специализированные ускорители, такие как Tensor Cores в более продвинутых моделях Jetson, оптимизированы для выполнения операций, характерных для нейросетевых вычислений, таких как свертки и матричные умножения. Это позволяет ещё больше повысить производительность, особенно при обучении и инференсе глубоких нейронных сетей. Таким образом, сочетание GPU и ускорителей делает устройства Jetson мощными инструментами для разработки и внедрения ИИ-приложений в различных сферах.

Сравнение различных моделей Jetson. Линейка устройств Nvidia Jetson включает в себя несколько моделей, каждая из которых оптимизирована для различных задач и требований, связанных с нейросетевыми вычислениями (рис.2). Основные модели, такие как Jetson Nano, TX2 и Xavier, отличаются по своим характеристикам, производительности и целевым применениям.

Jetson Nano является самой доступной и компактной моделью в серии. Она оснащена 128 ядрами CUDA и 4 ГБ оперативной памяти, что делает её подходящей для начальных проектов в области ИИ, особенно для задач, связанных с компьютерным зрением, робототехникой и простыми моделями глубокого обучения. Nano ориентирована на разработчиков, которые нуждаются в доступном и энергоэффективном решении для прототипирования.

Jetson TX2 представляет собой более мощную версию, оснащённую 256 ядрами CUDA и поддерживающую до 8 ГБ оперативной памяти. TX2 обеспечивает значительно лучшую производительность по сравнению с Nano и подходит для более сложных приложений, таких как обработка видео в реальном времени, автономные системы и робототехнические комплексы. Её высокая вычислительная мощность и энергоэффективность делают TX2 популярным выбором для промышленных и коммерческих решений [5].

Jetson Xavier оснащен 512 ядрами CUDA и 64 ядрами Tensor, а также поддерживает до 32 ГБ оперативной памяти. Xavier способен справляться с самыми требовательными задачами, такими как обучение сложных нейросетевых моделей, автономное вождение, расширенная видеоаналитика и ИИ на краю сети (Edge AI). Эта модель ориентирована на решения, требующие максимальной производительности и возможностей для масштабирования.

Jetson Orin – это одна из самых новых и мощных моделей в серии Jetson, предлагающая ещё более высокую производительность по сравнению с Xavier (рис.3). Orin оснащён до 2,048 ядер CUDA и 64 ядрами Tensor, а также поддерживает до 64 ГБ оперативной памяти. Эти характеристики делают Orin идеальным выбором для самых требовательных задач, таких как обучение глубоких нейронных сетей, сложные симуляции, обработка больших данных и реализация продвинутых ИИ-приложений. Orin отличается также улучшенными возможностями в области ИИ на краю (Edge AI), что позволяет ему обрабатывать данные в реальном времени с минимальной задержкой.

Jetson Orin Nano – это младшая версия Orin, которая сочетает в себе мощные возможности старшей модели с меньшими размерами и более низким энергопотреблением. Orin Nano предоставляет высокую производительность для приложений, где критичны компактные размеры и эффективность, таких как мобильные роботы, дроны и компактные системы видеоаналитики.

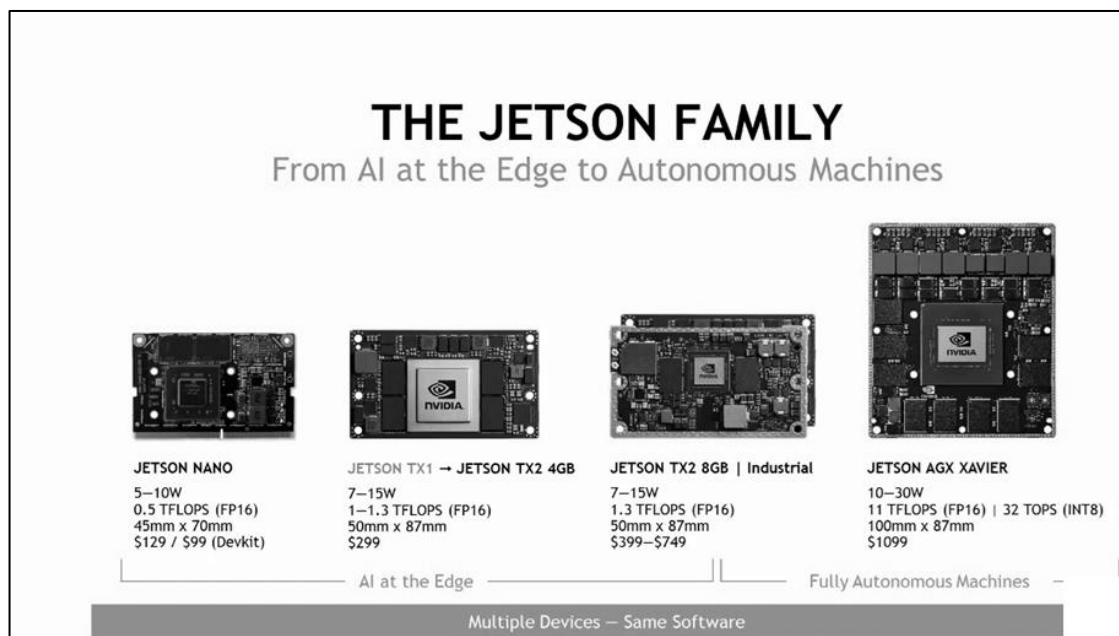


Рис. 2. Линейка серии jetson



Рис. 3. Jetson Orin

Подготовка устройств к использованию. Подготовка Jetson Orin для работы с нейросетями детекции YOLO (You Only Look Once) включает несколько ключевых этапов, начиная с настройки среды разработки и заканчивая оптимизацией производительности модели с использованием ускорения на графическом процессоре (GPU). Детекция объектов на основе нейросетей типа YOLO требует высокой вычислительной мощности и эффективности, что делает устройства серии Jetson, включая Orin, отличным выбором для таких задач благодаря интеграции графических процессоров NVIDIA и архитектуре CUDA.

Первым шагом в подготовке Jetson Orin для работы с нейросетями детекции YOLO является установка операционной системы и базовой среды разработки. Обычно устройства Jetson работают на базе операционной системы Ubuntu, специализированной под встраиваемые решения и глубинное обучение. Для загрузки операционной системы используется инструмент NVIDIA SDK Manager, который помогает легко установить систему и все необходимые пакеты для разработки на Jetson. SDK Manager позволяет автоматически установить JetPack — набор библиотек и инструментов, включающий драйверы CUDA, cuDNN для ускорения работы нейросетей, TensorRT для оптимизации моделей, а также библиотеку NVIDIA DeepStream для обработки видеопотоков в режиме реального времени.

После установки операционной системы и JetPack на Jetson Orin следующим этапом является подготовка среды для работы с нейросетью YOLO. Для этого необходимо установить платформу для глубокого обучения, например, PyTorch или TensorFlow. Поскольку YOLO традиционно реализована на базе PyTorch или TensorFlow, предпочтительно выбрать одну из этих библиотек в зависимости от конкретных требований проекта. Установка этих платформ может быть произведена через менеджеры пакетов `pip` или `conda`, но важно убедиться, что версии этих библиотек совместимы с CUDA и cuDNN для обеспечения аппаратного ускорения на GPU [6].

Затем необходимо установить саму модель YOLO. YOLO представлена в нескольких версиях, таких как YOLOv3, YOLOv4, и более новая YOLOv5, каждая из которых имеет различные требования к аппаратным ресурсам и точности детекции. В зависимости от версии YOLO, установка может быть осуществлена через репозиторий GitHub, где разработчики предоставляют исходный код модели, скрипты для обучения и тестирования, а также предобученные веса моделей. Как правило, установка YOLO требует клонирования репозитория и выполнения команды для установки зависимостей, таких как OpenCV для обработки изображений, библиотеки для работы с нейросетями и другие инструменты, необходимые для подготовки данных и их предобработки [7].

После установки модели YOLO на Jetson Orin, необходимо выполнить несколько оптимизаций для повышения производительности на встроенном GPU. В частности, Jetson Orin поддерживает NVIDIA TensorRT, который позволяет оптимизировать работу нейросетей и существенно сократить время вывода модели (инференса). TensorRT преобразует модель YOLO в формат, более эффективно использующий аппаратные возможности Jetson Orin, такие как тензорные ядра и оптимизация использования памяти. Преобразование модели в TensorRT может быть выполнено с помощью специальных скриптов, которые уже включены в большинство репозиториях YOLO. Это позволяет сократить время обработки кадров и повысить скорость детекции объектов, что особенно важно при работе в режиме реального времени.

После оптимизации модели с помощью TensorRT можно приступить к тестированию работы нейросети YOLO на Jetson Orin. Для этого необходимо подготовить тестовые наборы данных или подключить видеопоток с камеры. Jetson Orin поддерживает работу с множеством камер, включая стандартные USB-камеры и специальные камеры, такие как CSI-камеры, которые подключаются напрямую к плате через интерфейс MIPI. Для обработки видеопотока в режиме реального времени может быть использована библиотека NVIDIA DeepStream, которая оптимизирует обработку видео и позволяет реализовать сложные сценарии детекции и отслеживания объектов в потоковом видео.

Также важно учитывать, что для детекции объектов в режиме реального времени может потребоваться дополнительная настройка параметров модели YOLO, таких как размер входного изображения, скорость вывода и точность детекции. Эти параметры можно регулировать в зависимости от задач, стоящих перед проектом, например, для увеличения точности можно использовать более медленную модель с высоким изображений разрешением, а для повышения скорости — уменьшить разрешение входных.

Потенциальные возможности использования. Jetson Orin, благодаря своей высокой производительности и поддержке передовых технологий искусственного интеллекта, открывает широкие возможности для использования нейросетей детекции объектов, таких как YOLO, в различных приложениях. Основные области применения этой технологии включают промышленную автоматизацию, робототехнику, системы безопасности, медицинские устройства и умные города.

В промышленной автоматизации детекция объектов с использованием YOLO на базе Jetson Orin может быть применена для контроля качества продукции на производственных линиях, автоматизированного отслеживания дефектов и проверки соответствия стандартам. Например, роботизированные системы с интегрированной камерой могут идентифицировать дефекты или отклонения в продукции на конвейере, что значительно повышает эффективность производства и снижает количество ошибок.

Робототехника — еще одна важная область применения, где Jetson Orin и YOLO могут использоваться для создания автономных роботов, которые способны ориентироваться в пространстве, избегать препятствий и распознавать объекты. Это особенно полезно в логистике и на складах, где роботы могут автоматически сортировать, перемещать и доставлять товары, точно идентифицируя объекты и избегая столкновений. Кроме того, детекция объектов с помощью нейросетей улучшает безопасность и точность автономных систем, например, беспилотных летательных аппаратов (дронов) или самоходных автомобилей.

Системы безопасности также активно используют нейросети для распознавания объектов и лиц в реальном времени. Jetson Orin позволяет обрабатывать видеопотоки с камер наблюдения и использовать YOLO для обнаружения подозрительных объектов, распознавания лиц или отслеживания движений людей. Это может применяться в общественных местах, на стадионах или в аэропортах для повышения уровня безопасности. Например, такая система может автоматически обнаружить оставленный предмет, заподозрив его как потенциально опасный, или идентифицировать человека, находящегося в розыске [8].

Медицинские приложения являются еще одной важной сферой использования Jetson Orin и YOLO. В медицинских устройствах нейросети могут быть использованы для автоматической диагностики на основе изображений. Например, в рентгенографии или МРТ, модели YOLO могут помочь в обнаружении патологий или аномалий на медицинских снимках. Jetson Orin обеспечивает быструю обработку данных и позволяет применять такие решения непосредственно в медицинских устройствах, что сокращает время диагностики и повышает её точность.

В умных городах Jetson Orin и YOLO могут применяться для управления транспортными потоками и мониторинга общественной инфраструктуры. Детекция транспортных средств, пешеходов или дорожных знаков в режиме реального времени позволяет создавать системы интеллектуального управления дорожным движением, снижая количество аварий и повышая общую безопасность на дорогах. Например, такие системы могут автоматически регулировать светофоры, реагируя на плотность транспортных потоков, или предупреждать водителей о пешеходах, появляющихся на проезжей части.

Также значимым применением является использование в розничной торговле. YOLO на базе Jetson Orin может применяться для автоматической инвентаризации товаров на полках магазинов, отслеживания поведения покупателей или анализа потоков посетителей. Это помогает магазинам оптимизировать расположение товаров, повысить безопасность и улучшить обслуживание клиентов.

Таким образом, благодаря высокой производительности и поддержке аппаратного ускорения, Jetson Orin и нейросеть YOLO открывают широкие возможности для создания автономных и интеллектуальных систем, которые могут применяться в самых различных отраслях — от промышленности и медицины до умных городов и робототехники.

Jetson Orin также может использоваться в сельском хозяйстве для автоматизации различных процессов и повышения эффективности. С его помощью возможно создание автономных сельскохозяйственных машин, таких как тракторы и комбайны, которые могут анализировать поля, определять состояние посевов и автоматически обрабатывать почву. Технологии детекции на базе YOLO могут быть применены для мониторинга состояния растений, выявления болезней, анализа урожайности и оптимизации использования ресурсов, таких как вода и удобрения. Это позволяет повысить урожайность, снизить затраты и минимизировать воздействие на окружающую среду.

Jetson Orin открывает перспективы в области мониторинга окружающей среды. С его помощью можно создавать системы для автоматического анализа видео с дронов и стационарных камер для отслеживания изменений ландшафта, мониторинга состояния лесов, обнаружения лесных пожаров или загрязнений воды и воздуха (рис. 4). Автоматизированные системы на базе Jetson Orin могут использоваться для реагирования на природные катастрофы, предсказания экологических угроз и более быстрого принятия мер для их предотвращения [9].



Рис. 4. Применение устройств

Области, в которых уже применяются устройства Jetson в России. В России устройства Jetson от NVIDIA уже применяются в ряде ключевых отраслей, где требуются высокопроизводительные решения для обработки данных и искусственного интеллекта. Эти устройства находят свое применение в робототехнике, промышленной автоматизации, транспортных системах, безопасности, здравоохранении и сельском хозяйстве. Jetson стал платформой, способной реализовывать сложные алгоритмы машинного обучения и компьютерного зрения, что позволило внедрить их в различные проекты на территории страны.

Одной из основных областей, где устройства Jetson активно используются в России, является промышленная автоматизация и робототехника. В частности, Jetson внедряется в проекты по созданию автономных промышленных роботов, которые работают на производственных линиях, выполняют задачи по сборке, сортировке и контролю качества продукции. Например, такие роботы применяются на производственных предприятиях для автоматической сортировки объектов или проверки продукции на наличие дефектов, что существенно повышает эффективность производства и снижает человеческий фактор.

В транспортной сфере устройства Jetson используются для создания интеллектуальных систем управления транспортом и мониторинга дорожной инфраструктуры. В России ведутся разработки автономных транспортных средств, таких как беспилотные автомобили и дроны, которые активно тестируются и разрабатываются с использованием Jetson. Эти системы применяют нейросети для распознавания объектов, таких как транспортные средства, пешеходы, дорожные знаки и препятствия, что позволяет им безопасно передвигаться в городской среде. Кроме того, Jetson используется в системах мониторинга и управления дорожным движением, где он помогает в автоматической детекции дорожных происшествий, управлении светофорами и оптимизации транспортных потоков в городах.

Устройства Jetson также широко применяются в системах безопасности и видеонаблюдения. В России существует множество проектов, связанных с внедрением интеллектуальных систем видеонаблюдения на основе машинного обучения, где Jetson используется для детекции лиц, распознавания подозрительного поведения и отслеживания объектов в режиме реального времени. Такие системы находят применение в общественных местах, на транспортных узлах, в крупных торговых центрах и на предприятиях для обеспечения безопасности. Jetson позволяет обрабатывать видеопотоки с камер в реальном времени, что делает эти системы высокоэффективными и способными работать без участия человека.

Здравоохранение — еще одна важная область, где устройства Jetson нашли свое применение в России. Они используются в медицинских устройствах для анализа медицинских изображений, автоматической диагностики и мониторинга пациентов. Например, нейросети на базе Jetson могут использоваться для автоматической обработки рентгеновских снимков, анализа данных с медицинских датчиков и мониторинга состояния здоровья пациентов в режиме реального времени. Это позволяет сократить время диагностики, повысить точность выявления заболеваний и облегчить работу медицинского персонала.

В сельском хозяйстве в России также ведутся разработки с использованием устройств Jetson, особенно в направлении автоматизации процессов и повышения эффективности работы. Автономные сельскохозяйственные машины, такие как тракторы и комбайны, могут использовать Jetson для анализа полей, идентификации растений, оптимизации обработки почвы и посевов. В дополнение к этому, устройства Jetson применяются в системах мониторинга сельскохозяйственных культур с использованием беспилотных летательных аппаратов, которые могут собирать данные о состоянии полей, выявлять болезни растений и оценивать урожайность.

Кроме того, Jetson активно используется в образовательных и научных проектах, где он служит платформой для изучения и разработки решений в области искусственного интеллекта и робототехники. В университетах и исследовательских центрах России Jetson применяется в исследовательских проектах по созданию алгоритмов машинного обучения, компьютерного зрения и автономных систем. Это способствует развитию технологий в области ИИ и формирует новую генерацию специалистов, готовых к работе с высокотехнологичными решениями [10].

Таким образом, устройства Jetson находят широкое применение в России в различных отраслях, включая промышленность, транспорт, безопасность, здравоохранение и сельское хозяйство. Они позволяют решать задачи, связанные с обработкой больших объемов данных, детекцией объектов, автоматизацией процессов и созданием автономных систем, что делает их важным инструментом в реализации сложных проектов в области искусственного интеллекта и робототехники.

Выводы. Устройства NVIDIA серии Jetson имеют широкий спектр применения для работы с нейросетями, в частности, платформа Jetson Orin. Основной акцент делается на возможности использования нейросетей для детекции объектов с помощью моделей YOLO, что позволяет решать задачи в таких отраслях, как промышленная автоматизация, робототехника, системы безопасности, медицинские технологии и умные города. Устройства Jetson сочетают высокую производительность, малое энергопотребление и поддержку современных технологий искусственного интеллекта, что делает их эффективным инструментом для создания автономных и интеллектуальных систем.

Jetson Orin открывает новые перспективы для развития автономных транспортных средств, интеллектуальных систем видеонаблюдения и мониторинга, а также медицинских решений на базе нейросетей. Его мощные вычислительные возможности позволяют обрабатывать большие объемы данных в реальном времени, что существенно увеличивает точность и скорость решений в различных приложениях.

Таким образом, устройства NVIDIA Jetson играют ключевую роль в развитии искусственного интеллекта и машинного обучения, открывая широкие возможности для внедрения передовых технологий в различных отраслях [11].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ананьев, С. А. Искусственный интеллект на платформе NVIDIA Jetson: практическое руководство / С. А. Ананьев. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 320 с.
2. Кузнецов, В. Е. Применение нейронных сетей на платформе NVIDIA Jetson в робототехнике / В. Е. Кузнецов, А. И. Смирнов // Информационные технологии в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 45–52.
3. Киселёв, П. Н. Платформа NVIDIA Jetson для задач компьютерного зрения и нейросетевого моделирования / П. Н. Киселёв. – СПб.: Политехника, 2023. – 280 с.
4. Киреев, А. В. Платформа NVIDIA Jetson для автономных систем управления / А. В. Киреев // Автоматизация и ИТ. – 2022. – № 2. – С. 33–41.
5. Тимофеев, И. А. Разработка и внедрение систем машинного зрения на базе NVIDIA Jetson в России / И. А. Тимофеев. – М.: Техносфера, 2023. – 350 с.
6. Астраханцев, Д. В. Параллельные вычисления на базе платформы NVIDIA Jetson: опыт использования в научных исследованиях / Д. В. Астраханцев // Высокопроизводительные вычислительные системы. – 2023. – № 1. – С. 23–29.
7. Павленко, Б. В. Использование модели YOLO в современных задачах распознавания в реальном времени на примере военной и космической отраслей / Б. В. Павленко, В. И. Бондаренко, А. А. Мартыненко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 65–75. – EDN TJKNXI.

8. Воронов, С. И. Использование нейросетей на платформе NVIDIA Jetson для анализа видеопотоков / С. И. Воронов // Системы безопасности. – 2022. – № 3. – С. 71–78.
9. NVIDIA. NVIDIA Jetson AGX Orin Series Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. – URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/downloads> (дата обращения: 05.09.2024).
10. Deep Learning on NVIDIA Jetson Platform: Building AI Applications with NVIDIA Jetson and TensorRT / R. Panda, V. Sharma. – Springer, 2020. – 235 p.
11. Dusty Franklin. Deploying Deep Learning Models on NVIDIA Jetson with TensorRT. NVIDIA Developer Blog, 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://developer.nvidia.com/blog> (дата обращения: 05.09.2024).

Поступила в редакцию 24.12.2024 г., рекомендована к печати 22.01.2025 г.

NVIDIA JETSON SERIES DEVICES FOR WORKING WITH NEURAL NETWORKS

Vasilianov A.I., Bondarenko V.I.

The article discusses the Jetson series devices developed by Nvidia and their application in tasks related to neural network computing. The features of the Jetson architecture are described, which allows you to effectively perform operations related to machine learning and artificial intelligence, including image processing, video analytics and object recognition. Examples of the use of these devices in robotics, autonomous systems and other areas requiring high computing power with low power consumption are given. Special attention is paid to software that supports working with the Jetson platform, including deep learning frameworks and neural network optimization tools. The prospects of development and possible directions of using Jetson series devices in the future are also analyzed. Their role in the formation of new technologies and innovative solutions capable of accelerating the introduction of artificial intelligence into various spheres of human activity is considered.

Keywords: Nvidia Jetson, neural networks, machine learning, artificial intelligence, deep learning.

Васильянов Андрей Игоревич

магистрант кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, Донецк
E-mail: eliseevv02@mail.ru

Vasilianov Andrei Igorevich

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

Бондаренко Виталий Иванович

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

Bondarenko Vitalii Ivanovich

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

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАЩИТНОГО БЛОКИРУЮЩЕГО ОТКЛЮЧЕНИЯ РУДНИЧНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЕГО КОРПУСА

© 2025 Маренич М.К., Гуляева И.Б.

В статье даны обоснование алгоритма, параметров и структуры устройства, обеспечивающего выявление и блокирующее отключение силового присоединения шахтной участковой электрической сети в случае возникновения контакта фазного проводника с незаземлённым металлическим корпусом асинхронного двигателя.

Ключевые слова: шахта, участковая электрическая сеть, аварийное состояние, защита, блокирующее отключение, устройство, алгоритм, параметры.

Введение. Несмотря на обязательное условие применения режима изолированной нейтрали трансформатора в системах электроснабжения участков угольных шахт, эксплуатация таких систем сопряжена с риском электротравматизма. Исследованиями [1] установлено, что основную опасность электропоражения человека при его касании к фазному проводнику представляют ёмкостные проводимости изоляции кабельной сети, создающие условия для протекания значительных по величине токов утечки на землю. Опасность электропоражения человека повышается в условиях эксплуатации электропотребителей высокой мощности в связи с применением кабелей больших длин и сечений.

Собственно, ёмкостные проводимости в кабеле образуются между его фазными проводниками и центральным проводом (ЦП). Однако, принятая в промышленности концепция обязательного заземления электродвигателей, в т.ч. перемещаемых электроустановок подключением их металлических корпусов к заземлённым корпусам пускателей посредством ЦП кабелей электропитания, изначально предполагает формирование электропоражающего фактора – ёмкостей между фазами сети и землёй.

Альтернативным техническим решением является изменение концепции построения системы электроснабжения участка шахты, в соответствии с которой исключается присоединение ЦП кабелей электропитания к заземлениям в штатном режиме эксплуатации. В этом случае металлические корпуса асинхронных двигателей (АД) также будут не заземлены. Предусматривается выявление контакта фазы с корпусом АД на основе применения локальных средств (в структуре АД) контроля и управления защитным отключением пускателей.

Соответствующее схемное решение [1] отличается простотой и высокой надёжностью. Однако, применительно к многомашинному электротехническому комплексу, электрический контакт фазного проводника с корпусом АД может создать эффект защитного отключения двигателей смежных технологических установок при наличии малых переходных сопротивлений (R_n) между их металлическими корпусами и землёй. При этом, не представляется возможным в отключённой группе электропотребителей выявить силовое присоединение, в котором возник такой контакт (цепь «фаза – металлический корпус АД»).

Анализ функциональных возможностей технических средств защиты человека от электропоражения в шахтной участковой электрической сети выполнен в работах [2-4], где обоснована функциональная недостаточность применяемых в настоящее время аппаратов защиты от утечек тока на землю (типа АЗУР и т.п.) в части автокомпенсации ёмкости изоляции сети, выявления и закорачивания на землю повреждённой фазы. Здесь же, а также в исследовании [1] обосновывается ущербность концептуального решения в части применения ЦП кабеля электропитания в качестве заземляющего проводника в связи с формированием в этом случае значительных по величине ёмкостных проводимостей изоляции и, тем самым, превращения электросети в электропоражающий объект. Обосновывается альтернативное техническое решение в части выявления локальным устройством контакта фазы с корпусом АД без необходимости заземления последнего. Однако отсутствуют разработки в части обеспечения селективности выявления (в автоматическом режиме) силового присоединения с возникшей электрической цепью «фаза – корпус АД». Следует отметить, что и в действующей концепции построения системы электроснабжения участка шахты, в соответствии с которой заземлению подлежат все металлические корпуса электроустановок, не предусмотрены технические решения по выявлению конкретного силового присоединения, в котором возник контакт фазы с металлическим корпусом электродвигателя.

Целью исследования является обоснование структуры и алгоритма функционирования устройства, обеспечивающего возможность выявления (в процессе защитного отключения электрической сети участка шахты) силового присоединения, в котором возник контакт фазного проводника с незаземлённым металлическим корпусом асинхронного двигателя.

Основная часть исследования. Контакт фазного проводника с незаземлённым металлическим корпусом асинхронного двигателя может быть выявлен измерительной цепью, состоящей из последовательно соединённых резистора, конденсатора, обмотки исполнительного реле и диода, присоединённой между точкой «звезда» соединения обмоток статора АД и его металлическим корпусом. В этом случае контакт фазы с корпусом АД создаёт путь тока через данную измерительную цепь, что будет сопровождаться срабатыванием реле и последующим отключением по его команде пускателя АД.

В условиях эксплуатации многомашинного электротехнического комплекса (ЭТК) следует учитывать вероятность защитного отключения пускателей смежных присоединений при наличии малых переходных сопротивлений между металлическими корпусами их АД и землёй, поскольку вследствие включенного состояния контакторов пускателей ЭТК токи с «повреждённой» фазы через измерительную цепь и корпус «аварийного» АД, переходные сопротивления почвы (земли) будут также протекать по аналогичным измерительным цепям АД смежных присоединений. Этот эффект иллюстрируется структурой компьютерной модели (рис. 1).

В структуре модели активные сопротивления обмоток исполнительных реле объединены с сопротивлениями токоограничивающих резисторов в общее сопротивление (ΣR) измерительной цепи. Принято два АД типа 2ЭДКОФ 250LB4 с параметрами статора: $r_s = 0,057$ Ом; $L_s = 0,00063$ Гн (в модели эти параметры округлены). Линейное напряжение сети: $U = 660$ В, сопротивление переходное: $R_{\text{п}} = 0,5$ Ом, сопротивление контакта «фаза – корпус АД»: $R_{\text{к}} = 0,005$ Ом. На схеме (рис. 1) $\Sigma R = 1,0$ кОм.

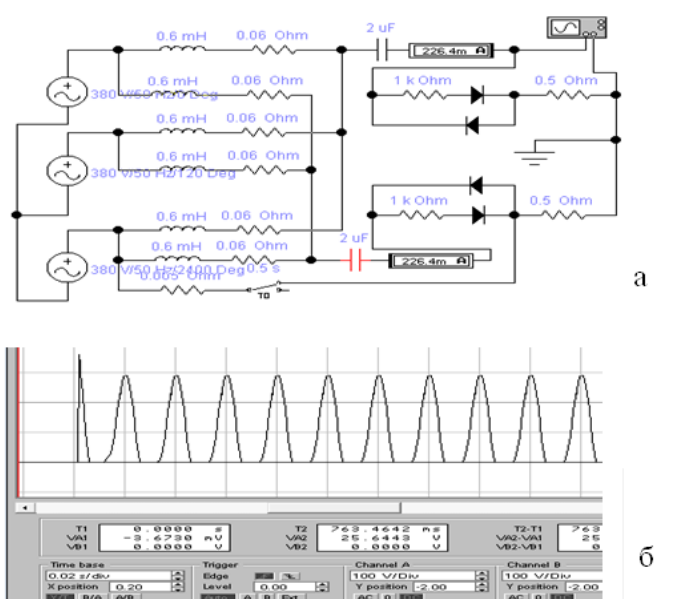


Рис. 1. Компьютерная модель:

- а) структура модели исследования процессов в многомашинном ЭТК при возникновении проводимости между фазой и незаземлённым корпусом АД
 б) осциллограмма напряжения на резисторе измерительной цепи

Структура компьютерной модели позволяет установить закономерности формирования величин амплитуд напряжений на резисторе измерительной R - C - VD – цепи, в зависимости от величин её ёмкости и активного сопротивления (соответственно, рис. 2). Линейное напряжение сети $U_c = 660$ В.

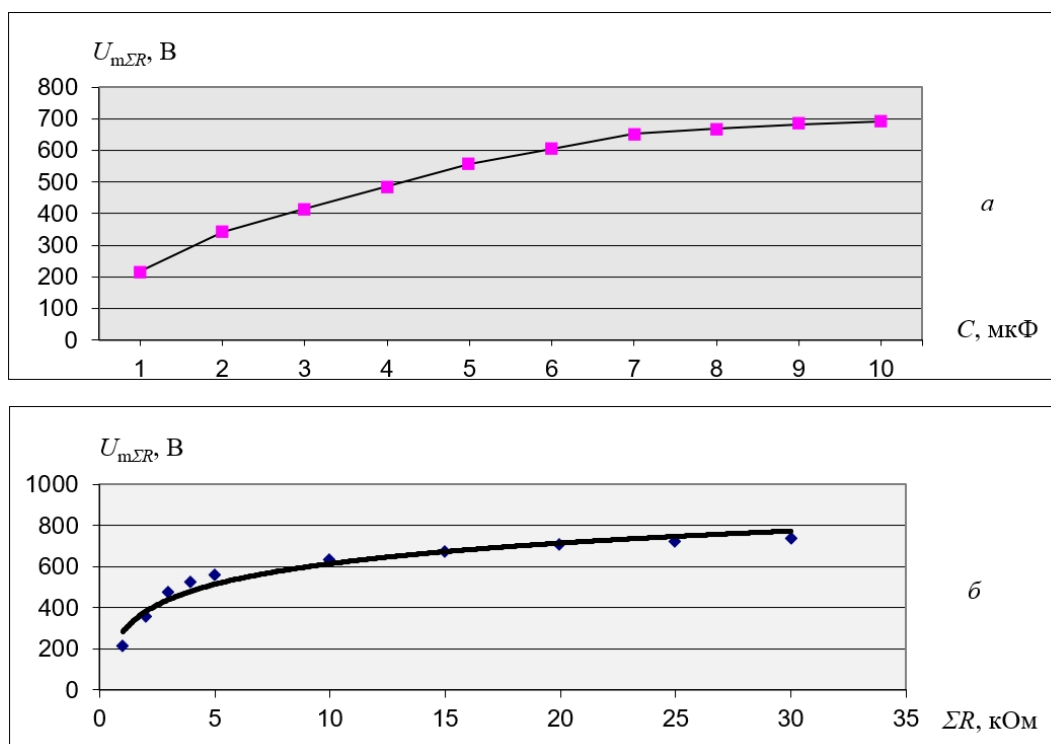


Рис. 2. Диаграммы напряжений $U_{m\Sigma R}$ на резисторе ΣR измерительной цепи в зависимости:
 а) от величины её ёмкости C при $\Sigma R = 1$ кОм б) величины резистора ΣR при $C = 1$ мкФ

При исследовании приняты ёмкости измерительной цепи $1,0 \leq C \leq 10,0$ мкФ, активное сопротивление $1,0 \leq \Sigma R \leq 30,0$ кОм. Установлено, что амплитуды импульсов (полуволн) напряжения $U_{m\Sigma R}$, формируемого на резисторе (ΣR) измерительной цепи, находятся в логарифмической зависимости как от ёмкости этой цепи, так и от её активного сопротивления. Так, в сети линейного напряжения $U_c = 660$ В:

- при $C = 1,0$ мкФ:

$$U_{m\sum R} = K_U (144, 51 \ln(\sum R) + 281, 16), B; \quad (1)$$

– при $\Sigma R = 1,0$ кОм:

$$U_{m\Sigma_R} = K_U(221, 17 \ln(C) + 197, 34), B; \quad (2)$$

где размерность ΣR – кОм; размерность C – мкФ, K_U – коэффициент напряжения, который позволяет масштабировать результаты моделирования процессов на электрические сети линейного напряжения U_c , отличного от напряжения 660 В, принятого при моделировании:

$$K_U = \frac{U_{cm}}{660\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где U_{cm} – амплитуда линейного напряжения сети.

Аналогичная тенденция наблюдается и при $C > 1,0$ мкФ, $\Sigma R > 1,0$ кОм. Полученные результаты позволяют корректно выбрать исполнительное реле (по номинальным напряжению и току), обмотка которого входит в состав общего сопротивления (ΣR) измерительной цепи.

При условии применения измерительных $R-C-VD$ цепей в структурах асинхронных двигателей участка шахты при не заземлении их металлических корпусов, задача обеспечения селективности выявления «аварийного» присоединения может быть решена на основе способа автоматического защитного блокирующего отключения рудничного АД, что иллюстрируется схемой (рис. 3).

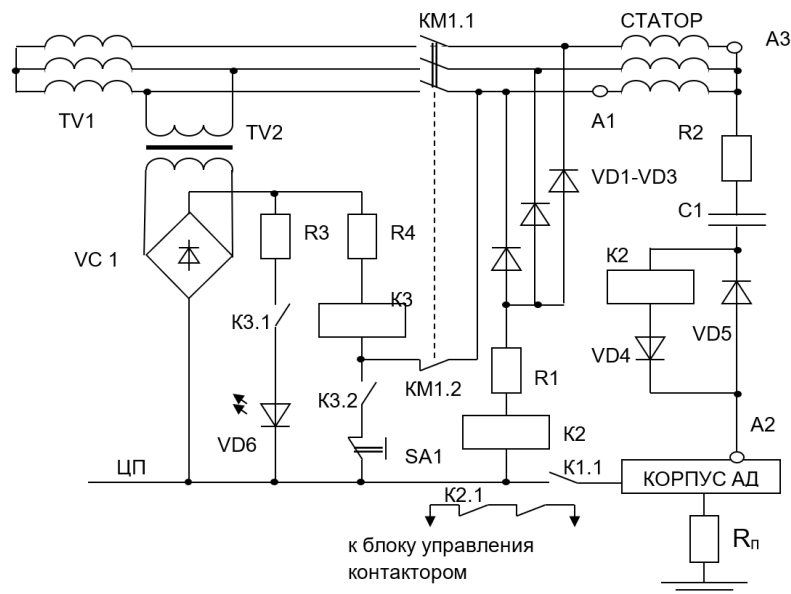


Рис. 3. Схема устройства защитного автоматического блокирующего отключения рудничного АД при отсутствии заземления его корпуса

При возникновении электрического контакта между фазой статора АД (точка «А1») и его металлическим корпусом (точка «А2») начнут протекать однополупериодные импульсы тока между точками «А3» («звезда» соединения обмоток статора АД) и «А2» (корпус АД) по цепи: $R2 \rightarrow C1 \rightarrow K1 \rightarrow VD4$, что вызовет срабатывание реле K1 и подключение центрального провода кабеля электропитания АД (замыканием контакта K1.1) к металлическому корпусу этого двигателя, находящемуся в контакте с фазой сети (точки «А1»; «А3»). В этом случае протекает ток в цепи обмотки реле K2 (центральный провод кабеля $\rightarrow K2 \rightarrow R1 \rightarrow$ диоды присоединения VD2, VD3 (из группы VD1 – VD3) $\rightarrow$ фазы сети). Срабатывание реле K2 обусловит отключение контактора KM1 пускателя (группы контактов KM1.1; KM1.2). При этом, в виду наличия цепи присоединения реле K2 к фазам сети (через R1 и VD1 – VD3), последнее, а также реле K1 останутся во включённом состоянии после отключения контактора KM1 пускателя на протяжении существования обратной ЭДС (e_6) АД, переходящего при отключении в режим выбега [5, 6]:

$$e_6 = \frac{L_m}{L_p} j(1-S)\omega_0 \psi_{op} e^{-\frac{1}{T_p}} e^{j\omega_0(1-S)t}, \quad (4)$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; s и ω_0 – скольжение и синхронная частота вращения ротора.

Постоянная времени снижения тока ротора:

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_n}{I_0 r_p \omega_0}. \quad (5)$$

где r_p – активное сопротивление обмотки ротора АД; U_ϕ – фазное напряжение статора двигателя в режиме холостого хода; $K_n = 1,1$ (для АД с воздушным охлаждением) – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной системы АД; I_0 – ток холостого хода АД.

Наличие переходных сопротивлений (R_n) между металлическими корпусами электродвигателей и землёй обуславливает протекание тока (в случае контакта фазы с корпусом одного из АД) по цепям $R2 \rightarrow C1 \rightarrow K1 \rightarrow VD4$ каждого из двигателей технологических установок участка шахты. При этом существует вероятность отключения их пускателей при малых величинах R_n соответствующих присоединений. Это обуславливает необходимость выявления конкретного силового присоединения с цепью повышенной электрической проводимости между фазой и незаземлённым металлическим корпусом электроустановки. В этой связи может быть задействована схема, аналогичная блокировочному реле утечки (БРУ) [7] и адаптированная к эксплуатации в системе электроснабжения участка шахты с отделёнными от заземления центральными проводами гибких экранированных кабелей.

В отличие от штатных устройств БРУ, функционирующих в сетях с заземлением металлических корпусов всех электроустановок, в схеме по рис. 3 выход «-» выпрямителя VC1 подключён не к цепи заземления, а к центральному проводу кабеля электропитания АД. Поэтому после отключения контакторов пускателей обеспечивается возможность выявления электрического контакта между точками «А1» и «А2» конкретного присоединения. Вследствие наличия обратной ЭДС асинхронного двигателя, перешедшего в состояние выбега, и при условии наличия контакта между «А1» и «А2» реле K1 останется во включённом состоянии на время, достаточное для срабатывания реле K3 БРУ (цепь оперативного тока: «+» выпрямителя VC1 $\rightarrow R3 \rightarrow K3 \rightarrow KM1.2 \rightarrow$ «А1» (фаза сети) $\rightarrow$ «А2» (корпус АД) $\rightarrow K1.1 \rightarrow$ «-» выпрямителя VC1).

В этом случае напряжение на резисторе ΣR , что соответствует сопротивлению последовательного соединения R_2 и K_2 по рис. 3 будет также описываться выражениями (1, 2) при условии, что в числителе формулы (3) амплитуда напряжения сети будет заменена на амплитудные значения ЭДС вращения АД (убывающей по величине с постоянной времени T_p) в соответствии с выражениями (4, 5).

При возникновении данного аварийного (опасного) состояния дальнейшая работа пускателя АД должна быть автоматически заблокирована, что достигается замыканием контакта $K_{3.2}$ и размыканием контакта $K_{3.3}$ (в цепи управления контактором пускателя) реле K_3 . Индикация данного состояния обеспечивается светодиодом VD_6 , а деблокировка вручную – кнопкой SA_1 .

Соответствующая блок-схема алгоритма автоматического защитного блокирующего отключения АД многомашинного электротехнического комплекса при отсутствии заземления его металлического корпуса представлена на рис. 4.

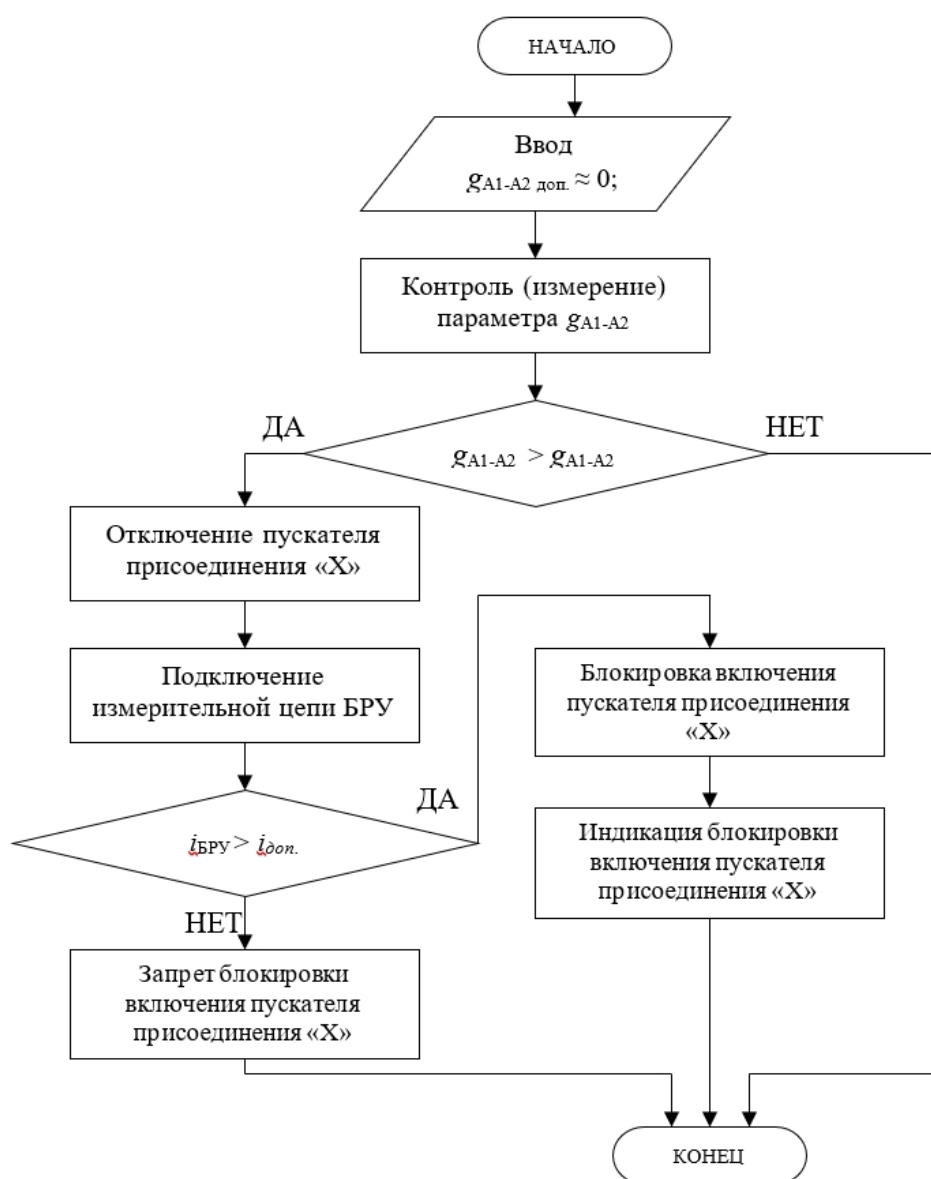


Рис. 4. Блок-схема алгоритма автоматического защитного блокирующего отключения асинхронного двигателя при отсутствии заземления его металлического корпуса

В блок-схеме алгоритма даны следующие обозначения:

- q_{A1-A2} - фактическая проводимость цепи «фаза-корпус АД»;
- $q_{A1-A2} \approx 0$ (См) - допустимая проводимость цепи «фаза-корпус АД»;
- $i_{БРУ}$ - оперативный ток, протекающий по обмотке реле КЗ;
- $i_{доп}$ - ток включения реле КЗ.

Алгоритмом также предусмотрена функция самоустранения контакта фазы с незаземлённым металлическим корпусом АД. С высокой долей вероятности эта функция будет реализована в силовых цепях остальных АД, отключение которых обусловлено наличием малых переходных сопротивлений ($R_{п}$) между корпусами двигателей и землёй и имело место в момент появления высокой проводимости между фазой и корпусом АД аварийного присоединения.

Выводы. Обоснованный алгоритм, схемные решения и параметры устройства автоматического защитного блокирующего отключения АД многомашинного электротехнического комплекса при отсутствии заземления его металлического корпуса позволяют повысить эффективность эксплуатации шахтной участковой электрической сети, обустроенной в соответствии с концепцией исключения формирования электропоражающего фактора (ёмкостной проводимости изоляции вследствие использования центральных проводов гибких кабелей в качестве элементов заземления корпусов АД).

Представленное техническое решение согласуется с концепцией применения в структуре АД локальных средств выявления контакта фазы с незаземлённым металлическим корпусом.

К перспективам дальнейших исследований следует отнести обоснование технических решений по корректировке функций и схем шахтных участковых средств защиты от утечек тока на землю в сетях с незаземлёнными силовыми присоединениями магнитных пускателей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Денисова, Е. В. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения / Е. В. Денисова, И. Б. Гуляева, М. К. Маренич // Горная промышленность. Научно-техн. и производств. журнал. – 2022. – № 4. – С. 110-118.
2. Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма. Проблемные вопросы и пути их решения / И. Б. Гуляева, Е. С. Дубинка, М. К. Маренич, [и др.] // Вестник ДонНТУ. – 2021. – Вып. 3 (25). – С. 34-47.
3. Гуляева, И. Б. Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты серии «АЗУР-1» / И. Б. Гуляева, Е. С. Дубинка, М. К. Маренич // Вестник ДонНТУ. – 2022. – Вып. 1 (27). – С. 50-60.
4. Маренич, М. К. Анализ эффективности защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю / М. К. Маренич // Вестник ДонНТУ. – 2022. – Вып. 2 (28). – С. 46-53.
5. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
6. Андреев, В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 209 с.
7. Руководство по ревизии, наладке и испытанию подземных электроустановок шахт / В. А. Чумаков, М. С. Глухов, Э. Р. Осипов [и др.]; под ред. Дехтярева В.И. – М.: Недра, 1989. – 614 с.

Поступила в редакцию 09.01.2025 г., рекомендована к печати 27.01.2025 г.

ALGORITHM OF AUTOMATIC PROTECTIVE BLOCKING SHUTDOWN OF A MINE
ASYNCHRONOUS MOTOR WHEN ITS CASE IS NOT GROUNDED

Marenich M.K., Guliaeva I.B.

The article provides a rationale for the algorithm, parameters and structure of the device, which provides identification and blocking disconnection of the power connection of a mine local electrical network in the event of contact of a phase conductor with an ungrounded metal case of an asynchronous motor.

Keywords: mine, local electrical network, emergency condition, protection, blocking shutdown, device, algorithm, parameters.

Маренич Мария Константиновна

аспирант кафедры электрических системы
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: marenich_mk@mail.ru

Marenich Mariia Konstantinovna

Postgraduate student at Department of Electrical
Systems of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гуляева Ирина Борисовна

кандидат технических наук, доцент кафедры
электрических системы ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail iraguliaeva1969@gmail.com

Guliaeva Irina Borisovna

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor at Department of Electrical Systems of
Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПРОЦЕДУРА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ СООБЩЕНИЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ В АСУ И АСНИ

© 2025 Подлесный В.Ю., Третьяков И.А., Данилов В.В., Колесник Е.В., Худяков И.И.

В настоящей работе представлены результаты исследования основ информационно-измерительных технологий, в частности, процедура восстановления непрерывных измерительных сообщений интерполяционными алгебраическими полиномами и процедура определения средней квадратической погрешности дискретного представления. Рассмотрен интерполатор по показателю среднего квадратического приближения на основе теории линейной фильтрации.

Ключевые слова: АСУ, АСНИ, информационно-измерительная система, измерительные сообщения, информационные характеристики, полином, интерполяция, погрешность, выборка.

Введение. Устойчивый рост использования автоматизированных систем управления (АСУ) и автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) в современных производственных процессах невозможен без постоянного качественного повышения характеристик их информационно-измерительных и управляющих систем и подсистем [1-5]. Наиболее эффективным образом усовершенствование информационно-измерительных и управляющих систем происходит не за счет улучшения элементной базы, устройств и блоков, а через внедрение результатов синтеза знаний [6, 7] как фундаментальных, так и прикладных наук. В частности, информационные технологии становятся особенно важными при разработке АСНИ, где критически важна точность обрабатываемых данных [8-10].

В работах [11, 12] проводились исследования основ информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ, в частности информационные характеристики (модели) измерительных сообщений, модели стационарных и нестационарных случайных измерительных процессов, погрешности при измерениях и передаче, а также исследования дискретной формы представления непрерывных измерительных процессов, в частности погрешность восстановления при дискретном представлении непрерывных процессов, оптимальное дискретное представление, дискретизация полиномами Лежандра. Настоящая работа является логическим продолжением предыдущих работ авторов по основам информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ [11, 12] в части восстановления непрерывных сообщений интерполяционными алгебраическими полиномами и интерполяции по показателю среднего квадратического приближения.

Восстановление непрерывных измерительных сообщений интерполяционными алгебраическими полиномами. Для восстановления непрерывных сообщений, представленных регулярными выборками, используем интерполяцию или интерполяционную обработку. Последнее понятие обычно используют, когда восстановление ведется по зашумленным (искаженным) выборкам.

В качестве интерполирующих функций предлагается использовать функции различной сложности (например, различного рода полиномы). В соответствии с теоремой Котельникова, возможно со сколь угодно высокой точностью восстановить любой непрерывный случайный процесс $\lambda(t)$ по его дискретным регулярным выборкам при следующих условиях:

- процесс имеет ограниченный спектр (например, от 0 до F_c);
- процесс наблюдается бесконечное время ($T_u \rightarrow \infty$);
- выборки сообщения формируются с частотой опроса $F_0 \rightarrow 2F_c$;

-восстановление процесса ведется по точным (не зашумленным) значениям выборок в форме ряда $\lambda(t) = \lambda(t) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \lambda(t_i) W_u(t-t_i) p$, с помощью, так называемых функций отсчета $W_u(t-t_i) = \frac{\sin \pi F_0(t-t_i)}{\pi F_0(t-t_i)}$.

Однако, теорема Котельникова дает лишь предельные (потенциальные) соотношения для определенных идеализированных условий, основными из которых являются ограниченность спектра и бесконечное время наблюдения. К этим предельным соотношениям можно лишь стремиться, никогда их не достигая. Восстановление реальных непрерывных процессов $\lambda(t)$ с неограниченным спектром по выборкам λ_i за конечное время наблюдения может выполняться лишь с определенной интерполяционной погрешностью при использовании как ряда Котельникова, так и любой другой интерполяционной формулы (метода интерполяции); причем всегда частоту опроса F_0 следует выбирать исходя из допустимой погрешности, и при этом она оказывается существенно выше чем $2F_c$. Значение интерполяционной погрешности зависит от вида сообщения, полноты априорного знания его характеристик, метода интерполяции и значения частоты опроса F_0 [13, 14]. Поэтому, при создании импульсных систем измерений и передачи приходится решать ряд задач, связанных с выбором тактовой частоты опроса и метода (оператора) интерполяционной обработки, а также учитывать интерполяционные погрешности.

Процесс интерполяции (восстановления) непрерывного сообщения $\lambda(t)$ по его выборкам $\lambda_i(t) = \lambda(t_i)$ может быть представлен в форме ряда, аналогичного $B(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{N_k}) = \sum_{i=0}^{N_k} \lambda_i W_i(t) = \lambda^*(t)$ [12]:

$$\lambda^*(t) = \sum_{i=0}^{N_k} \lambda^*(t_i) W_u(t-t_i) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_{N_k}, \quad (1)$$

где $\lambda^*(t)$ - оценка восстанавливаемого процесса (интерполирующая функция); $\lambda^*(t_i)$ - оценка значения выборки с учетом ее зашумленности; $W_u(t-t_i)$ - элементарная интерполирующая функция (импульсная весовая функция интерполятора); $(N_k + 1)$ - число выборок, принимающих участие в процессе интерполяции (число $(N_k + 1)$ определяет также время переходного процесса в интерполяторе); $T_u = (t_{N_k} - t_0)$ - интервал интерполяции. Выражение (1) показывает, что процесс $\lambda^*(t)$ на выходе интерполятора определяется как линейная сумма реакций интерполятора на мгновенные импульсы (выборки), т. е. для интерполятора справедлив принцип суперпозиции.

При анализе и синтезе любых импульсных систем приходится заменять непрерывную функцию $\lambda(t)$ соответствующей ей решетчатой функцией $\lambda[iT_0]$, т. е. такой функцией, значения которой изменяются лишь при дискретных, обычно равноотстоящих друг от друга, значениях независимой переменной t . Решетчатая функция получается из непрерывной, если положить $t = iT_0$, т. е.

$$\lambda(t)|_{t=iT_0} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda(kT_0) \delta(kT_0 - IT_0).$$

Помимо простых решетчатых функций, используются так называемые решетчатые смещенные функции $\lambda[iT_0, \Delta t]$, которые получаются из непрерывных, если положить в них $t = iT_0 + \Delta t$, где $0 \leq \Delta t \leq T_0$ характеризует сдвиг аргумента. Необходимо отметить, что с изменением Δt меняется и аргумент, и ордината функции $\lambda[iT_0, \Delta t]$.

Для удобства записей воспользуемся относительным временем $t' = t/T_0 = l + \xi$, где $\xi = \Delta t/T_0$ - доля периода следования импульсов, причем $0 \leq \xi \leq 1$. В этом случае смещенная решетчатая функция записывается в виде $\lambda[l + \xi] = \lambda[t, \xi]$. Соответственно при использовании решетчатых функций выражение (1) может быть переписано в виде:

$$\lambda^*(l, \xi) = \sum_{i=0}^{N_k} \lambda^*[i, 0] W_H[l - i, \xi] = \sum_{i=0}^{N_k} \lambda^*[l - k, \xi] W_H[k, \xi], \quad (2)$$

где $l = 0$ при $N_k = 0$; $l = 0, 1, 2, \dots, (N_k - 1)$ при $N_k \geq 1$; $W_H[l - i, \xi] = W_H[l + \xi - i] = W_H[k - \xi] = W_H[k, \xi]$.

Вследствие простоты реализации, для восстановления непрерывных сообщений по дискретным выборкам широко используются алгебраические полиномы, в основном полиномы Лагранжа. Интерполяционный полином Лагранжа записывается в виде (1), где весовая импульсная функция интерполирующего устройства при интерполяции полиномами Лагранжа имеет вид:

$$W_H(t - t_i) = \frac{(t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_{i-1})(t - t_{i+1}) \dots (t - t_{N_k})}{(t_i - t_0)(t_i - t_1) \dots (t_i - t_{i-1})(t_i - t_{i+1}) \dots (t_i - t_{N_k})}, \quad (3)$$

здесь $(N_k + 1)$ - число точек, по которым осуществляется интерполяция, причем $t_0 \leq t \leq t_{N_k}$.

Если перейти к относительному времени $t' = l + \xi$, то при $l = 0$:

$$W_H[i, \xi] = \frac{(\xi - 0)(\xi - 1)(\xi - 2) \dots [\xi - (i - 1)][\xi - (i + 1)] \dots (\xi - N_k)}{(i - 0)(i - 1)(i - 2) \dots [i - (i - 1)][i - (i + 1)] \dots (i - N_k)}. \quad (4)$$

Следует отметить, что интерполяционные формулы Ньютона, Гаусса, Бесселя, Стирлинга, Эверетта и др. являются разновидностями интерполяционной формулы Лагранжа.

Далее рассмотрим интерполятор по показателю среднего квадратического приближения, синтез и анализ которого могут быть проведены на основании как частотной, так и временной методики теории линейной фильтрации.

Частотная методика теории линейной фильтрации. Частотная методика предполагает последовательность действий, когда процесс интерполяции трактуется как процесс фильтрации исходной функции $\lambda(t)$ из последовательности выборок. В соответствии с преобразованием Фурье, преобразование непрерывной функции $\lambda(t)$ в дискретную $\lambda(t_i)$ с мгновенными импульсами приводит к преобразованию двусторонней спектральной плотности мощности $S_\lambda(t)$ в последовательность смещенных двусторонних спектральных плотностей в соответствии с формулой [15, 16]:

$$S_\lambda(t) = (1/T_0) \{S_\lambda(\omega) + \sum_{\substack{i=-\infty \\ i \neq 0}}^{\infty} S_\lambda(\omega + 2\pi i/T_0)\} = (1/T_0) \{S_\lambda(\omega) + S_n(\omega)\},$$

где $S_{\Pi}(\omega) = \sum_{\substack{i=-\infty \\ i \neq 0}}^{\infty} S_{\lambda}(\omega + 2\pi i / T_0)$ – спектральная плотность мощности смещенных

составляющих спектра дискретных выборок с амплитудно-импульсной модуляцией.

В зависимости от ширины спектра сообщения и периода опроса смещенные спектры могут перекрываться или не перекрываться. Если сообщение имеет ограниченный спектр шириной F_c и $F_0 \geq 2F_c$, то имеется возможность с помощью идеального фильтра нижних частот с частотой среза $F_{cp} = F_c$ отделить полезные составляющие сообщения от смещенных спектров и тем самым не искаженно восстановить сообщение $\lambda(t)$. Если сообщение имеет неограниченный спектр или не соблюдается условие $F_0 \geq 2F_c$ (F_c – граничная частота сообщения с ограниченным спектром), то смещенные спектры перекрываются, по дискретным выборкам нельзя без искаженно восстановить сообщение. В последнем случае сумму спектральных составляющих $S_{\Pi}(\omega)$ в (4), начиная с $i = 1$, следует рассматривать как помеху [17].

В большинстве случаев можно считать, что составляющие основного спектра сообщения $S_{\lambda}(\omega)$, проходящие через интерполятор, и составляющие смещенных спектров $S_{\Pi}(\omega)$, попадающие в полосу пропускания интерполятора, являются статистически независимыми.

В этом случае дисперсия интерполяционной погрешности рассчитывается на основании известного выражения [16, 18]:

$$\sigma_{np}^2 = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} |1 - W_{\Pi}(j\omega)|^2 S_{\lambda}(\omega) d\omega + 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} |1 - W_{\Pi}(j\omega)|^2 S_{\Pi}(\omega) d\omega. \quad (5)$$

Первый член выражения (5) определяет динамическую составляющую ошибки интерполяции, обусловленную искажением составляющих полезного сообщения при прохождении через интерполирующее устройство; второй член, помеховую составляющую, возникающую вследствие попадания в полосу пропускания интерполятора смещенных составляющих спектра дискретных выборок.

Если мгновенные выборки сообщения зашумлены, то суммарная спектральная плотность мощности помех предлагается определять с помощью выражения:

$$S_{\Sigma\Pi} = S_{\Sigma}(\omega) + (1/T_0) \cdot \sum_{\substack{i=-\infty \\ i \neq 0}}^{\infty} S_{\lambda}(\omega + 2\pi i / T_0),$$

где $S_{\Sigma}(\omega)$ – спектральная плотность мощности внешних помех (шумов).

Если, как и ранее, сообщение и помехи считать независимыми стационарными процессами, то дисперсию суммарной погрешности предлагается определить по формуле:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} |1 - W_u(j\omega)|^2 S_{\lambda}(\omega) d\omega + 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} |1 - W_u(j\omega)|^2 S_{\Sigma\Pi}(\omega) d\omega. \quad (6)$$

Второй член выражения (6) определяет помеховую составляющую, обусловленную действием суммарных помех (внешних помех и смещенных составляющих спектра дискретных выборок).

При передаче и запоминании выборки могут быть искажены вследствие действия помех и квантования по уровню (в цифровых системах). В большинстве случаев зашумленные выборки предлагается представлять в виде аддитивной смеси не зашумленных (чистых) выборок и некоррелированного дискретного белого шума с двусторонней спектральной плотностью мощности $S_{\Sigma}(\omega)$, которая определяется

приближенным равенством $S_{ш}(\omega) = S_{ш} \approx \sigma_{ш}^2 T_0$, где $\sigma_{ш}^2$ – дисперсия погрешности в фиксации значения одной выборки сообщения, принимаемая одинаковой для всех выборок. В общем случае $\sigma_{ш}^2$ зависит от метода передачи (записи), метода приема (обработки) и отношения сигнала к шуму в канале связи.

Дисперсия флюктуационной составляющей погрешности (обусловленной только внешними помехами) в оценке сообщения на выходе интерполятора в стационарном режиме определим, используя выражение [18]:

$$\sigma_{\phi\lambda}^2 = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} |W_H(j\omega)|^2 S_{ш}(\omega) d\omega = S_{ш} \Delta f_{\text{эф}} = \gamma_{\phi} \sigma_{ш}^2. \quad (7)$$

где $\Delta f_{\text{эф}}$ – эффективная полоса пропускания интерполирующего устройства, определяемая зависимостью $\Delta f_{\text{эф}} = 1/(2\pi) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |W_H(j\omega)|^2 d\omega$; $\gamma_{\phi} = \Delta f_{\text{эф}} / F_0$ – коэффициент фильтрующей способности интерполятора по отношению к внешним помехам типа дискретного шума, определенный согласно [12]. Таким образом, очевидно, что всегда $\gamma_{\phi} \leq 1$, и чем меньше γ_{ϕ} , тем лучшими фильтрующими свойствами обладает интерполятор.

Временная методика теории линейной фильтрации. Временная методика основана на использовании корреляционной функции сообщения $R_{\lambda}(\tau)$ и весовой импульсной функции интерполятора $W_i(\tau) = W_u(t - t_i)$. Текущее значение погрешности интерполяции в момент времени $l + \xi$ на интервале от l до $l + 1$ в результате интерполяции будет определяться выражением:

$$\varepsilon[l, \xi] = \lambda[l, \xi] - \lambda * [l, \xi] = \lambda[l, \xi] - \sum_{i=0}^{N_k} \lambda[i, 0] W_H[l - i, \xi].$$

Средний квадрат (дисперсия) погрешности в дискретные моменты времени в пределах интервала интерполяции будет определяться выражением [19]:

$$\sigma_{пп}^2[l, \xi] = \sigma_u^2[l, \xi] = \sigma_{\lambda}^2 - 2 \sum_{i=0}^{N_k} \lambda[i, 0] W_H[l - i, \xi] + \sum_{i=0}^{N_k} \sum_{k=0}^{N_k} R_{\lambda}[i - k, 0] W_H[l - i, \xi] W_H[l - k, \xi]. \quad (8)$$

где $l = 0$ при $N_k = 0$; $l = 0, 1, 2, \dots, (N_k - 1)$ при $N_k \geq 1$. Из полученного выражения (8) видно, что дисперсия интерполяционной погрешности состоит из двух составляющих: динамическая (первые два члена в (7)) и помеховая (третий член в (8)).

Так как, при интерполяции нас интересует дисперсия непрерывной выходной величины, то, взяв среднее обеих частей последнего выражения по времени $l + \xi$, можем получить выражение для дисперсии погрешности на интервале интерполяции:

$$\sigma_{пп}^2 = \sigma_H^2 = \begin{cases} \sigma_{пп}^2[0] & \text{при } N_k = 0; \\ N_k^{-1} \sum_{i=0}^{N_k-1} \sigma_{пп}^2[l] & \text{при } N_k \geq 0 \end{cases}, \quad (9)$$

где $\sigma_{пп}^2[l] = \int_0^1 \sigma_{пп}^2[l, \xi] d\xi$.

Таким образом, полученные выражения позволяют рассчитывать значения σ_H^2 , по заданным $R_{\lambda}(\tau)$, $W_i(t)$ и T_0 или определять необходимый тактовый период опроса T_0 при заданных $R_{\lambda}(\tau)$, $W_i(t)$ при отсутствии зашумленности выборок.

Дисперсия суммарной погрешности восстановления сообщения по дискретным выборкам на выходе интерполятора будет определяться выражением:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_H^2 + \gamma_{\phi} \sigma_{\omega}^2, \quad (10)$$

При интерполяции алгебраическими полиномами по равностоящим отсчетам весовую функцию интерполятора удобно находить по интерполяционной формуле Лагранжа, т. е. по формуле (3) или (4).

Процедура определения средней квадратической погрешности дискретного представления. Определим величину средней квадратической погрешности $\delta_{\text{пр}}^2$ представления на выходе интерполятора для $N_k=0$ и $N_k=1$ при восстановлении стационарных случайных сообщений с нулевым средним.

Используя (4), (8) и (9) при симметричной ступенчатой интерполяции [$N_k=0$; $-0,5 \leq \xi \leq 0,5$; $W_u(0, \xi)=1$] получим $\delta_{\text{пр}}^2 = \sigma_{\text{пр}}^2 / \sigma_v^2 = 2 - 4 \int_0^{0,5} r_{\lambda}[0, \xi] d\xi$. Линейная интерполяция [$N_k=0$; $0 \leq \xi \leq 1$; $W_u(0, \xi)=1-\xi$; $W_u(0, \xi)=\xi$] позволяет получить: $\delta_{\text{пр}}^2 = 5/3 + (1/3)r_{\lambda}[1, 0] - 4 \int_0^1 r_{\lambda}[0, \xi] d\xi + 4 \int_0^1 \xi r_{\lambda}[0, \xi] d\xi$. При восстановлении сообщения с нормированной корреляционной функцией вида:

$$r_{\lambda}[l, \xi] = \sin \Omega_c T_9[l + \xi] / (\Omega_c T_9[l + \xi]) = \sin \pi[l + \xi] / \nu / [(\pi[l + \xi] / \nu)],$$

при ступенчатой симметричной интерполяции получим:

$$\sigma_{\text{пр}}^2 = 2 - 4 \int_0^{0,5} \sin \pi \xi / \nu / [(\pi \xi / \nu)] d\xi = 2 - (4\nu / \pi) \int_0^{\pi/(2\nu)} (\sin x / x) dx,$$

где $x = \pi \xi / \nu$.

Учитывая, что $\int_0^{\pi/(2\nu)} (\sin x / x) dx = \text{Si}(\frac{\pi}{2\nu})$, его разложение в ряд дает

$\text{Si}(\frac{\pi}{2\nu}) \approx \pi / (2\nu) - 1 / (3 \cdot 3!) \cdot [\pi / (2\nu)]^3$. Результатом является $\sigma_{\text{пр}}^2 = \pi^2 / (36\nu^2)$, что позволяет утверждать, что $F_0 = 2F_c \nu = \Omega_c / (6\delta_{\text{пр}})$.

Результаты определения $\delta_{\text{пр}}^2$ согласно предложенной процедуре для других видов сообщений и типов интерполяторов, а так же зависимости $\nu = f(\delta_{\text{пр}})$ приведенной частоты опроса $\nu = F_0 / (2F_c)$ как функции погрешности приведены в [12]. Отметим, что дискретизация сообщения с ограниченным спектром при ступенчатой интерполяции требует в $\pi / (6\delta_{\text{пр}})$ раз более высокой частоты опроса по сравнению с частотой опроса, определяемой по теореме Котельникова. Сравнение выражений для тактовой частоты опроса для двух видов сообщений при одном и том же виде интерполятора показывает, что для восстановления сообщения с неограниченным спектром требуется значительно более высокая частота опроса.

Выводы. Работа посвящена разработке основ информационно измерительных технологий в АСУ и АСНИ. Показаны результаты исследования дискретной формы представления непрерывных измерительных процессов, а именно:

- восстановление непрерывных измерительных сообщений предлагается осуществлять интерполяционными алгебраическими полиномами. Это особенно эффективно при восстановлении по зашумленным выборкам. Показано, что при анализе и синтезе импульсных систем, приходится применять решетчатые функции, т.е. такие функции, значения которых изменяются при дискретных, обычно равноотстоящих друг от друга, значениях независимой переменной t ;

- интерполяцию по показателю среднего квадратического приближения предложено проводить по двум методикам, (частотной и временной) основанным на теории линейной фильтрации;

- использование частотной методики объясняется как процесс фильтрации исходной функции $\lambda(t)$ из последовательности выборок. Дисперсия флуктуационной составляющей погрешности (обусловленной только внешними помехами) в оценке сообщения на выходе интерполятора в стационарном режиме предложено определить в виде (7), где вводится эффективная полоса пропускания интерполирующего устройства и коэффициент фильтрующей способности интерполятора по отношению к внешним помехам типа дискретного шума. Делается заключение, что коэффициент фильтрующей способности интерполятора всегда меньше либо равен 1, и чем он меньше, тем лучшими фильтрующими свойствами будет обладать интерполятор;

- временная методика определения интерполяционных погрешностей подразумевает использование корреляционной функции сообщения и весовой импульсной функции интерполятора. Дисперсия суммарной погрешности восстановления сообщения по дискретным выборкам на выходе интерполятора будет определяться выражением (10). При интерполяции алгебраическими полиномами по равностоящим отсчетам весовую функцию интерполятора удобно находить по интерполяционной формуле Лагранжа, т. е. по формуле (2) или (3).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Обеспечение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем / О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, В. В. Шерстнев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4(34). – С. 5-16. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-1. – EDN JXMQIW.
2. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 4-8. – EDN VAUJKR.
3. Полтавский, А. В. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна / А. В. Полтавский, А. А. Тюгашев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2021. – № 4(36). – С. 44-55. – DOI 10.21685/2307-4205-2021-4-6. – EDN UOUUMU.
4. Валеев, А. Ф. Информационно-программное обеспечение автоматизированной системы научных исследований живучести объектов добычи газа / А. Ф. Валеев // Программные продукты и системы. – 2023. – № 2. – С. 263-271. – DOI 10.15827/0236-235X.142.263-271. – EDN BYTWNK.
5. Полтавский, А. В. Модель управления состоянием оптико-электронного тракта информационно-измерительных и управляющих систем / А. В. Полтавский, Н. А. Кузин, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. – № 3(45). – С. 5-15. – EDN ZBTOQU.
6. Винограденко, А. М. Метод синтеза интеллектуальных систем контроля технического состояния территориально-распределенных комплексов связи специального назначения / А. М. Винограденко // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 24-35. – DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-4-24-35. – EDN APHZUI.
7. Синтез методов цифровой регистрации в системах сбора и обработки измерительной информации для обеспечения достоверности в информационно-управляющих системах / Ж. У. Севинов, Б. М. Темербекова, У. Б. Маманазаров, Б. М. Бекимбетов // Потомки Аль-Фаргани. – 2024. – №4. – С. 91-96. – DOI 10.5281/zenodo.14555403.
8. Пометун, Е. Д. Оптимизация определения градуировочной характеристики NTC-термистора при автоматизации измерений нестационарной температуры / Е. Д. Пометун, А. А. Беззуб // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 61-65. – EDN MIVMFV.
9. Автоматизированный комплекс получения вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов / Я. И. Рушечников, А. В. Яновский, В. Ю. Подлесный, И. И. Худяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 22-27. – EDN NDBPCV.

10. Безбородова, О. Е. Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система контроля состояния территориальной техносферы / О. Е. Безбородова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 2(40). – С. 21-28. – DOI 10.21685/2307-5538-2022-2-3. – EDN ZPLXVQ.
11. Основы информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Е. В. Колесник // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 64-74. – DOI 10.5281/zenodo.14018604. – EDN SDSQAP.
12. Оптимальное дискретное представление непрерывных измерительных процессов в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 52-62. – DOI 10.5281/zenodo.14514529. – EDN VEQGYZ.
13. Раннев, Г. Г. Измерительные информационные системы / Г. Г. Раннев. – М.: Академия, 2010. – 329 с.
14. Андриевский, Б. Р. Элементы математического моделирования в программных средах МАТЛАБ и Scilab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2001. – 286 с.
15. Кузин, Л. Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления / Л. Т. Кузин. – М.: Машгиз, 1962. – 683 с.
16. Киреев, В. И. Численные методы в примерах и задачах / В. И. Киреев, А. В. Пантелеев. – СПб.: Лань, 2015. – 447 с.
17. Третьяков, И. А. Текстонезависимая идентификация речи в условиях помех / И. А. Третьяков, Е. Н. Кожекина, В. И. Сыровацкий // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 64-77. – EDN LUBRVH.
18. Корниенко, В. П. Методы оптимизации / В. П. Корниенко. – М.: Высшая школа, 2007. – 663 с.
19. Волков, В. Л. Проектирование цифровых алгоритмов информационно-измерительных систем / В. Л. Волков. – Москва: Изд-во МАИ, 1991. – 33 с.

Поступила в редакцию 10.01.2025 г., рекомендована к печати 03.02.2025 г.

PROCEDURE FOR RECOVERING CONTINUOUS MESSAGES IN MEASUREMENT PROCESSES
IN ACS AND ASRS

Podlesnyi V.IU., Tretiakov I.A., Danilov V.V., Kolesnik E.V., Khudiakov I.I.

This paper presents the results of a study of the fundamentals of information and measurement technologies, in particular, the procedure for restoring continuous measurement messages by interpolating algebraic polynomials and the procedure for determining the average square error of a discrete representation. An interpolator based on the average square approximation indicator based on the theory of linear filtration is considered.

Keywords: ACS, ASRS, information and measurement system, measurement messages, information characteristics, polynomial, interpolation, error, sampling.

Подлесный Владимир Юрьевич

аспирант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pikaayzek@yandex.ru

Podlesnyi Vladimir IUrevich

Postgraduate Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

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

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Колесник Екатерина Витальевна

аспирант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ketrinkilli@ya.ru

Kolesnik Ekaterina Vitalevna

Postgraduate Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Худяков Игорь Иванович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ih2048@mail.ru

KHudiakov Igor Ivanovich

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

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕНИТЕНЦИАРНОГО СЕКТОРА

© 2025 Пономарёв Д.С.

В статье рассмотрено практическое применение методов градиентного бустинга в решениях задач производственного пенитенциарного сектора на примере разработанного ранее программного комплекса, в основе которого лежат такие библиотеки Python как SciKit-Learn, Catboost, Streamlit, Pandas. Непосредственно сам прикладной пример, который рассмотрен в работе, базируется на решении задачи бинарного прогноза для моделирования несчастных случаев на производствах пенитенциарной системы. Целью представленного исследования являлось показать особенности применения методов машинного обучения к прикладным задачам, которые актуальны для производств пенитенциарной системы. Новизна работы заключается в полученных результатах исследования, которые содержат особенности применения рассматриваемого инструмента прогнозирования.

Ключевые слова: машинное обучение, Python, системный анализ, бинарный прогноз, оптимизация, безопасность труда, пенитенциарная система.

Введение. Градиентный бустинг, являющийся развитием подхода случайного леса, представляет собой метод машинного обучения, который объединяет множество слабых моделей, обычно деревьев решений, в единую сильную модель. Основная идея состоит в последовательном обучении моделей, каждая из которых сосредотачивается на устранении ошибок предыдущей. Такой подход позволяет эффективно решать задачи регрессии и классификации, обеспечивая высокую точность предсказаний. В основе метода лежит принцип оптимизации функции потерь, который направлен на минимизацию ошибки на каждом этапе обучения.

Одним из ключевых преимуществ градиентного бустинга является возможность создания моделей, которые часто превосходят по точности случайные леса, при этом сохраняя их основные преимущества, такие как устойчивость к выбросам и работа с неполными данными. За счет последовательного добавления моделей, каждая из которых специализируется на "сложных" для предыдущих данных, метод достигает высокой степени адаптации к различным типам задач. Особенно это заметно при работе с деревьями решений, где градиентный бустинг помогает преодолеть ограничения отдельных деревьев, такие как склонность к переобучению или недостаточная обобщающая способность [1].

На сегодняшний день градиентный бустинг занимает лидирующие позиции среди алгоритмов машинного обучения для задач общего назначения. Он демонстрирует исключительные результаты в большинстве приложений, не связанных с распознаванием изображений или текстов, где доминируют методы глубокого обучения.

Методы градиентного бустинга в решении задач производственного пенитенциарного сектора могут быть использованы в следующих сферах и направлениях:

- прогнозирование спроса и оптимизация производства (например, в решении задачи, когда в производственном секторе важно точно прогнозировать спрос на продукцию, чтобы оптимизировать загрузку мощностей, управлять запасами и минимизировать издержки);

- оптимизация логистики и управления ресурсами (например, модели могут быть использованы для предсказания времени доставки, оптимальных маршрутов и загрузки транспорта, а применение градиентного бустинга может помочь в выявлении ключевых факторов, влияющих на задержки или простои, и предложить решения для их минимизации);

- прогнозирование рецидивизма в пенитенциарном секторе (модели могут анализировать данные о заключенных (возраст, образование, криминальная история, психологические характеристики) и предсказывать вероятность рецидивизма, градиентный бустинг позволяет учитывать сложные взаимодействия между переменными, что делает его эффективным для таких задач);

- оптимизация расписаний и распределения ресурсов в тюрьмах (в пенитенциарных учреждениях важно эффективно распределять ресурсы (персонал, помещения, программы реабилитации) и оптимизировать расписания, модели могут быть использованы для прогнозирования нагрузки на персонал, оптимального распределения заключенных по камерам и планирования мероприятий, а градиентный бустинг может помочь в выявлении факторов, влияющих на конфликты или нарушения режима, и предложить меры для их предотвращения);

- обнаружение аномалий и мониторинг безопасности (в производственном пенитенциарном секторе важно своевременно выявлять аномалии (например, сбои в оборудовании или нарушения режима), модели могут быть обучены на данных, описывающих нормальное поведение, и использоваться для обнаружения отклонений, например, обнаружение аномалий в работе производственного оборудования или выявление подозрительного поведения осужденных).

Таким образом, применение методов градиентного бустинга имеет достаточно обширную область. В данной статье же будет рассмотрен пример бинарного прогноза несчастных случаев (с летальным исходом) на производствах пенитенциарной системы.

Реализация методов градиентного бустинга. Для начала следует рассмотреть библиотеки, которые реализуют методы машинного обучения. В качестве основы для анализа были рассмотрены наиболее известные библиотеки Python. Можно выделить три наиболее популярные библиотеки, которые активно используются исследователями на сегодняшний день для создания моделей на основе градиентного бустинга [2]: CatBoost [3], XGBoost [4] и LightGBM [5]. Библиотека CatBoost является отечественной разработкой компании «Яндекс» и на сегодняшний день передана в общее пользование. Поэтому она представляет достаточно большой интерес.

Рассмотрим библиотеку CatBoost более подробно. Для неё будут характерны следующие особенности: улучшенная работа (по сравнению с остальными двумя библиотеками) с категориальными признаками (автоматическая обработка категориальных признаков, с возможностью избавиться от необходимости их предварительного кодирования и предобработки, что является одним из главных преимуществ для данной библиотеки); использование технологии «Ordered Boosting» (на основе L2-регуляризации), благодаря которой снижается вероятность переобучения, что делает модель более устойчивой; оптимизированы гиперпараметры (требуется меньше настроек для достижения удовлетворяющих результатов по сравнению с библиотеками XGBoost и LightGBM).

Соответственно, из преимуществ данной библиотеки можно выделить: улучшенную (по сравнению с другими двумя библиотеками) работу с категориальными данными; высокую стабильность и меньшую вероятность переобучения; получение удовлетворительных результатов при меньшей работе (по сравнению с остальными библиотеками) с гиперпараметрами. Из недостатков можно выделить: потребление памяти больше, чем в библиотеках XGBoost и LightGBM; более медленные процессы обучения и предсказаний по сравнению с LightGBM. На рисунке 1 далее представлен алгоритм, реализующий основные принципы библиотеки Catboost.

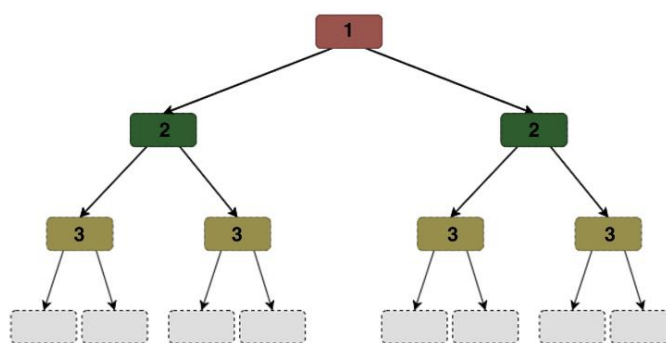


Рис. 1. Алгоритм обучения, реализованных в библиотеке Catboost

Как видно из алгоритма, представленного на рисунке 1, основной принцип здесь заключается в том, что каждая вершина одного уровня имеет одинаковую функцию, что позволяет избавиться от дополнительных ветвлений и накладывает ограничение на форму дерева. Преимуществом этого решения будут: эффективность исполняемого кода; устойчивость к переобучению. При этом основным критерием остановки обучения будет ограничение «глубины» дерева.

Практическое применение. Рассмотрим применение разработанного ранее программного комплекса для создания моделей градиентного бустинга и дальнейшего их использования, в основе которого лежит библиотека Catboost [6]. Исследуем особенности практического применения разработанного инструмента информационной системы на примере решения задач прогноза для бинарной классификации. Одним из актуальных вопросов практически каждого современного масштабного производства является соблюдение правил охраны труда и безопасности жизнедеятельности. Производства пенитенциарной системы в данной проблеме не являются исключением: ввиду специфики работающего спецконтингента данный вопрос является особенно актуальным. В первую очередь здесь следует рассмотреть наличие несчастных случаев на производстве с летальным исходом. Согласно работам [7, 8] проведение статистических исследований для значений показателя смертности (в том числе и на производствах) является достаточно важным вопросом пенитенциарной системы.

Выбор параметров будет строиться на проведенных ранее исследованиях, в которых были раскрыты особенности взаимосвязи между статистическими показателями. Так, в работах [9, 10] было доказано непосредственное влияние показателей социально-значимых заболеваний как на качество трудовых ресурсов, так и на качество производственных процессов. В работе [11] было доказано, что параметры, отражающие распространенность социально-значимых заболеваний следует рассматривать в относительных значениях от среднесписочной численности. В работе [12, 13] рассмотрено влияние факторов тюремной и криминальной субкультур на спецконтингент, и как следствие, на качество трудовых ресурсов.

Задачей рассматриваемого примера является не только показать возможность применения разработанного инструмента на практике, но и вывить связь (или доказать ее отсутствие) между качеством трудовых ресурсов и негативными последствиями на производствах. Поэтому, не рассматривались такие параметры как заработная плата, объем производства, количество человеко-часов. Внимание исследования было направлено только на непосредственно качество трудовых ресурсов. В результате, в разработке были использованы следующие параметры (таблица 1). Индексы параметров были сформированы в соответствии с опубликованной ранее разработкой [14].

Таблица 1. Рассмотренные параметры для обучения модели

Индекс	Название	Тип
X4_1_41	Несчастный случай на производстве с летальным исходом	исходящий (<i>bool</i>)
X4_1_1	Общая среднесписочная численность	входящий (<i>int</i>)
X3_1_90	Численность лиц, осужденных за преступление «кража» (ст. 158 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_96	Численность лиц, осужденных за преступление «вымогательство» (ст. 163 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_98	Численность лиц, осужденных за преступления в сфере экономической деятельности (глава 22 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_100	Численность лиц, осужденных за преступление «хулиганство» (ст. 213 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_108	преступления против мира и безопасности человечества (глава 34 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_112	Численность лиц, осужденных за преступление «бандитизм» (ст. 209 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_102	преступления, связанные с незаконным оборотом наркотиков (ст. 228 – 233 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_94	Численность лиц, осужденных за преступление «разбой» (ст. 162 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_92	Численность лиц, осужденных за преступление «грабеж» (ст. 161 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_84	Численность лиц, осужденных за преступление «умышленное причинение тяжкого вреда здоровью» (ч. 1-3 ст. 111 УК Российской Федерации)	входящий (<i>int</i>)
X3_1_82	Численность лиц, осужденных за преступление согласно ст. 105, 107, 108, 109 и ч. 4 ст. 111 УК Российской Федерации	входящий (<i>int</i>)
X4_1_51	Численность больных ВИЧ-инфекцией	входящий (<i>int</i>)
X4_1_71	Численность лиц, больных алкоголизмом	входящий (<i>int</i>)
X4_1_74	Численность лиц, больных наркоманией	входящий (<i>int</i>)
-	Регион	входящий (<i>str</i>)
-	Квартал	входящий (<i>str</i>)

Для проведения дальнейшего исследования была сформирована выборка, по данным собранным в период с 2018 по 2021 год по регионам РФ, период учета – поквартально. Общий объем составил 2301 точек. Разделение данных при проведении обучения на тестовую и обучающую выборки проводилось с ориентиром на правило Парето (80% данных для обучающей выборки и 20% для тестовой). Параметр X4_1_41 был принят в качестве исходящего сигнала модели и сдвинут на один период (в нашем случае квартал) относительно входящих сигналов. Это было сделано для того, чтоб на основе существующих показателей можно было сформировать прогноз на следующий период.

Особенностью градиентного бустинга является то, что при изменении гиперпараметров значимость входящих данных относительно исходящих может меняться. Поэтому, для получения достоверной картины, обучение моделей следует проводить многократно, каждый раз подбирая значения гиперпараметров и учитывая при этом проверку точности модели на независимой выборке. Поэтому, гиперпараметры «Learning rate», «Depth», «L2» были подобраны эмпирически, «Test size» был установлен на 0,2, а «Iterations» был выставлен в максимальное значение. Максимальной точности удалось достичь при следующей настройке гиперпараметров (таблица 2).

Таблица 2. Настройки параметров для обучения модели

Test size (%)	Количество входящих сигналов (числовые данные)	Количество входящих сигналов (категориальные данные)	Iterations	Learning rate	Depth	L2	Время обучения (секунды)	Точность (%)
20	15	3	1000	0,10	6,00	3,00	62,99	98,89

При этом значимость входящих сигналов относительно исходящего была получена следующая (рисунок 2).

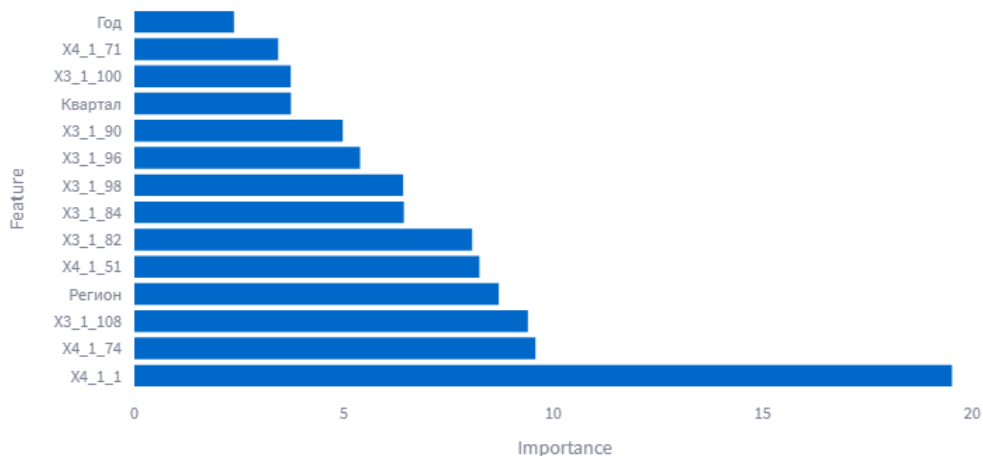


Рис. 2. Значимость входящих сигналов модели относительно исходящего сигнала

Как видно из графика, представленного на рисунке 2, с большим отрывом от остальных параметров выделяется среднесписочная численность спецконтингента (данный результат очевиден: чем больше количество работников на производстве, тем выше вероятность возникновения несчастного случая), далее результаты более интересные: среднесписочная численность больных наркоманией и ВИЧ-инфекцией, а также среднесписочное количество осужденных за преступления против мира и безопасности человечества (глава 34 УК Российской Федерации) и за преступления согласно ст. 105, 107, 108, 109 и ч. 4 ст. 111 УК Российской Федерации (т.е. убийство с превышением мер, в состоянии аффекта) – можно выделить в отдельную группу, которая являет собой следующий уровень значимости после среднесписочной численности. Далее, идет убывание значимости параметров попарно: среднесписочная численность лиц, осужденных за преступление «умышленное причинение тяжкого вреда здоровью» (ч. 1-3 ст. 111 УК Российской Федерации) и численность лиц, осужденных за преступления в сфере экономической деятельности (глава 22 УК Российской Федерации); среднесписочная численность лиц, осужденных за преступление «кража» (ст. 158 УК Российской Федерации) и численность лиц, осужденных за преступление «вымогательство» (ст. 163 УК Российской Федерации).

Рассмотрим оптимизацию времени обучения модели без снижения точности полученной модели. Непосредственно сам процесс обучения модели представлен на рисунке 3 далее.

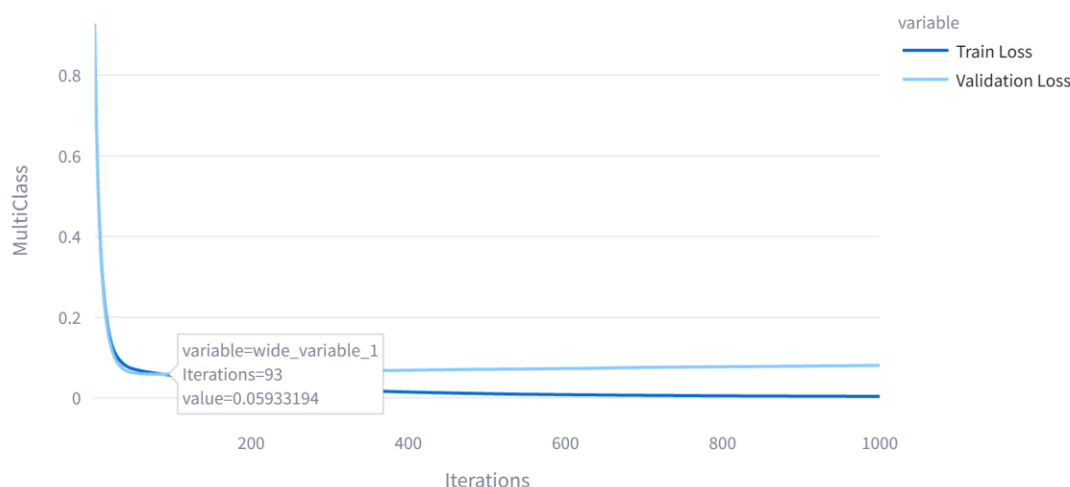


Рис. 3. Визуализация процесса обучения

Проведем оптимизацию для «Iterations». Как видно из представленного графика процесса обучения, при Iterations=93 точность модели практически не изменится. Далее, рассмотрим оптимизацию параметров: исходя из графика, представленного на рисунке 2 – удалим наименее значимые параметры (начиная с наименее значимых параметров, удаление параметров проводилось до тех пор, пока не начинала меняться точность модели, значения гиперпараметров при этом уже не менялись): «Год», X4_1_71, X3_1_100, «Квартал».

В результате проведенных действий по оптимизации и настройке, при новом обучении модели – время было сокращено с 117,48 секунд до 13,80 секунд, точность модели при этом в округлении до сотых осталась практически прежней (98,78%). Таким образом, представленные подходы имеют место быть, если требуется сократить время обучения модели (таблица 3).

Таблица 3. Корректировка настроек параметров для обучения модели

Test size (%)	Количество входящих сигналов (числовые данные)	Количество входящих сигналов (категориальные данные)	Iterations	Learning rate	Depth	L2	Время обучения (секунды)	Точность (%)
20	9	1	93	0,10	6,00	3,00	21,24	98,78

Рассмотрим применение обученной модели на независимой выборке. Проверочная выборка была сформирована по данным с 2022 по 2023 годы. Объем выборки составил 623 точек. В формировании были использованы те же параметры, что и в обучении. В итоге, точность ранее обученной модели на независимой составила 89,51%, что является достаточно неплохим результатом.

Основным недостатком обученной модели явилось то, что в 71,43% ошибочных случаев модель предсказывала отсутствие несчастных случаев, в то время как в фактических данных независимой проверочной выборки наблюдалось наличие несчастного случая на производстве (т.е. предсказано отсутствие события, в то время как фактически оно произошло – в нашем случае летальный исход на производстве).

В первую очередь это произошло потому, что в обучающей выборке количество отсутствия несчастных случаев на производстве во много раз меньше, чем их наличие. Представленный пример демонстрирует, что даже несмотря на высокую точность обученной модели, ее применение в некоторых случаях может быть рассмотрено только в качестве рекомендательного инструмента поддержки принятия решений.

Заключение. В представленной работе рассмотрены особенности использования методов градиентного бустинга в качестве одного из инструментов информационной системы предприятия. Рассмотрены примеры прикладного использования на статистических данных. В результате проведенных численных экспериментов, было установлено, что несмотря на высокую точность обученных моделей, их применение не всегда может быть хорошим решением: во-первых важную роль играют непосредственно сами данные – такие факторы как отсутствие нормального распределения данных, их однотипность и наличие выбросов – могут сыграть негативно для исследователя; во-вторых следует учитывать непосредственно сами условия поставленной задачи – ошибочно полученные результаты модели для событий, которые фактически произошли (ложно-отрицательное событие) в некоторых случаях для пенитенциарной системы являются недопустимыми. Поэтому, представленные разработки, даже при достаточно высокой предсказательной точности обученных моделей, следует рассматривать лишь как инструмент поддержки принятия решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сысоев, А. С. Подход к определению влиятельности входов модели catboost при использовании модификаций факторов / А. С. Сысоев, А. В. Галкин, Е. Л. Домашнева // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 11. – С. 50-53.
2. Передерий, В. А. Сравнительная характеристика библиотек машинного обучения для внедрения искусственного интеллекта в CRM-систему/ В. А. Передерий, М. Л. Рысин // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 4 (112). – С. 141-155.
3. Библиотека CatBoost. Техническая документация [Электронный ресурс] – URL: <https://catboost.ai/docs/en/> (дата обращения 15.01.2025).
4. Библиотека XGBoost [Электронный ресурс]. – URL: <https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/>. (дата обращения 15.01.2025).
5. Библиотека LightGBM [Электронный ресурс]. – URL: <https://lightgbm.readthedocs.io/en/latest/>. (дата обращения 15.01.2025).
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024685168 Российская Федерация. «Программа для создания моделей машинного обучения на основе методов градиентного бустинга» : № 2024684271 : заявл. 15.10.2024 : опубл. 25.10.2024 / Д. С. Пономарев ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний». – EDN AFGUNE.
7. Бурт, А. А. Анализ исполнения Комплексного плана по снижению смертности в учреждениях УИС за 2020 год: отчет о НИР / А. А. Бурт, Е. В. Ильинцев, Д. С. Пономарев. – М.: ФКУ НИИ ФСИН России. Основание разработки: п. 8.4. Раздела I Плана НИД ФКУ НИИ ФСИН России на 2021 год, п. 150 Плана НИД ФСИН России на 2021 год. – Москва, 2021. – 45 с.
8. Пономарев, Д. С. Методическая разработка для статистического анализа смертности в территориальных органах ФСИН России / Научные труды ФКУ НИИ ФСИН России. Научно-практическое ежеквартальное издание. – 2021. – Т. 2. – С. 270-274.
9. Пономарев С. Б. О Роли искусственной социальной энтропии в генезисе тюремной субкультуры / С. Б. Пономарев // Научный вестник Омской академии МВД России. – 2024. – Т. 30. – № 4 (95). – С. 384-389.
10. Пономарев, С. Б. Опыт создания модели прогноза смертности у ВИЧ-инфицированных осужденных с использованием информации о вирусных гепатитах и туберкулезе / С. Б. Пономарев, С. А. Стерликов, Е. Л. Аверьянова // Пенитенциарная медицина в России и за рубежом. Сборник научных статей. – Москва, 2022. – С. 73-76.

11. Automatization and information technologies development for monitoring and evaluation of penitentiary healthcare facilities efficiency / E. V. Dyuzheva, G. A. Blagodatsky, D. S. Ponomarev [et al] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Paper ID 12118.
12. Пономарев, С. Б. Феномен "МАНА" в тюремной субкультуре / С. Б. Пономарев // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Философия. Политология. Культурология. – 2024. – Т. 10. – № 2. – С. 54-64.
13. Пономарев, С. Б. Этология пенитенциарного пространства / С. Б. Пономарев // Практическая философия: состояние и перспективы. Сборник материалов VI научной конференции (с международным участием). – Симферополь, 2023. – С. 129-132.
14. Пономарёв, Д. С. Разработка систем индексации данных для производственно-экономического и трудового секторов пенитенциарной системы / Д. С. Пономарёв // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 3 (111). – С. 100-108.

Поступила в редакцию 17.01.2025 г., рекомендована к печати 06.02.2025 г.

PRACTICAL APPLICATION OF GRADIENT BOOSTING METHODS IN SOLVING PROBLEMS OF THE PRODUCTION PENITENTIARY SECTOR

Ponomarev D.S.

The article discusses the practical application of gradient boosting methods in solving problems of the industrial penitentiary sector using the example of a previously developed software package based on such Python libraries as SciKit-Learn, Catboost, Streamlit, Pandas. The applied example itself, which is considered in the work, is based on solving the problem of binary forecasting for modeling accidents in the production of the penitentiary system. The purpose of the presented study was to show the features of applying machine learning methods to applied problems that are relevant for the production of the penitentiary system. The novelty of the work lies in the obtained research results, which contain the features of applying the forecasting tool under consideration.

Keywords: machine learning, Python, systems analysis, binary forecast, optimization, labor safety, penitentiary system.

Пономарёв Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», доцент кафедры водоснабжения и водоподготовки ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.

E-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

Ponomarev Dmitrii Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Associate Professor of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.

МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА

© 2025 Кукарцева Е.С., Петренко Т.С., Сысков А.М., Борисов В.И.

Цель исследования заключалась в установлении значимых связей между когнитивными процессами и параметрами движения глаз человека. Применяя различные модели метода машинного обучения при анализе сигнала движения глаз (айтрекинга) во время выполнения различных типов когнитивной нагрузки, удалось разработать систему классификации когнитивных функций человека. Для достижения цели проведен обзор применения современных методов машинного обучения для задачи классификации в психофизиологии; проведен сбор, разметка и предобработка собственного датасета сигналов, снятых в среде виртуальной реальности; проведен анализ данных и выделены статистически значимые признаки, определяющие взаимосвязь с когнитивными процессами человека; произведено обучение различных моделей классификации; спроектирована модель системы нейрореабилитации.

Ключевые слова: айтрекинг, машинное обучение, нейрореабилитация, виртуальная реальность, когнитивные функции.

Введение. Когнитивные расстройства становятся все более актуальной проблемой в последние годы. Это связано с увеличением продолжительности жизни населения, ускорением ритма жизни, повышением требований к когнитивному статусу. В современных условиях повреждение нервной системы имеет значимые последствия для профессионального статуса, порой, на протяжении всей жизни индивидуума. Растет актуальность совершенствования методов нейрореабилитации. Существующие методы тренировки и восстановления когнитивных функций затратны, сложны и трудоемки для пациента, порой, обладают невысокой эффективностью.

Существует ряд препятствий, затрудняющих исследования в области когнитивных наук, таких как – отсутствие единой нейрофизиологической модели когнитивных функций человека, высокая скорость электрофизиологических изменений в нервной ткани, быстрая адаптация и феномен нейропластичности, а также - трудности анализа биосигналов для объективизации когнитивных процессов. Таким образом, разработка простых и эффективных методов когнитивной реабилитации сегодня является нетривиальной и весьма актуальной задачей.

Иммерсионные среды. На первый план в организации и функционировании дистанционной медицинской реабилитации выходят современные технологии, а именно расширенная реальность и ее классические компоненты, такие как виртуальная (VR), дополненная и смешанная реальность. VR уже успешно используется для тренировки или восстановления когнитивных способностей у людей, перенесших повреждение головного мозга. Кроме того, использование виртуальной реальности имеет ряд преимуществ, таких как мониторинг состояния пациента в режиме реального времени, дистанционная передача результатов анализов лечащему врачу, проведение реабилитационных мероприятий в удаленном формате и т.д.

Сигнал движения глаз. В последние годы технология отслеживания движения глаз привлекла к себе большое внимание благодаря своему потенциалу в различных областях, включая психологию, неврологию, и взаимодействие человека и компьютера. Данные отслеживания движения глаз могут дать представление о когнитивных процессах, механизмах внимания и визуальном восприятии.

Характеристики движений глаз претерпевают изменения при многочисленных заболеваниях центральной нервной системы, что делает эти характеристики надежными биомаркерами. Использование методов машинного обучения облегчает решение вопросов медицинской классификации на основе данных, полученных методом трекинга глаз во время выполнения различных окуломоторных задач. Создание алгоритмов для обработки исходных данных, полученных с помощью глазных трекеров, и их последующей классификации является актуальной инженерной задачей.

Нейрореабилитация. На фоне все большего внедрения достижений технологического прогресса и цифровизации медицины, реабилитацию когнитивных способностей можно организовать как с применением традиционных методов, так и с применением инновационных инструментов (таких, как виртуальная реальность, дополненная реальность, нейростимуляция и т.д.). Методы реабилитации когнитивных способностей разбивают на мероприятия по восстановлению отдельных компонентов: память, речь, внимание, восприятие, воображение, мышление.

К сожалению, на сегодняшний день существуют подтвержденные методы для реабилитации только социально-значимых когнитивных функций (речь, внимание, память, восприятие).

Машинное обучение в медицине. Исследования по отслеживанию взгляда также увеличились в последние годы. Многие исследователи проводят свои эксперименты с вопросом о том, как можно использовать данные отслеживания взгляда в своих исследованиях. Оценки с отслеживанием глаз позволяют получить крупномасштабные данные временных и пространственных последовательностей, а также множество функций зрительного внимания, которые могут быть изучены с помощью алгоритмов машинного обучения для классификации заболеваний и поддержки принятия клинических решений.

Обзор современных методов решения. Здесь собраны некоторые значимые исследования и статьи, относящиеся к использованию признаков, которые могут быть получены из данных отслеживания взгляда для классификации с 2019 года по 2024 год.

В исследовании [1] методы машинного обучения совместно с анализом движения глаз применяют для идентификации дислексии во время чтения. Выбор наиболее важных признаков движений глаз осуществлялся методом случайного леса (RF). Далее найденные признаки применялись в качестве входных данных для классификатора метода опорных векторов (SVM). Предложенный авторами гибридный метод показал точность 89.7%.

Исследование [2] демонстрирует возможность прогнозировать синдром дефицита внимания по данным отслеживания взгляда, полученные с применением виртуальной реальности. Классификатор на основе SVM показал свою эффективность в решении поставленной задачи, продемонстрировав отличную оценку AUC 0,92 после десятикратной перекрестной проверки.

Статья [3] посвящена исследованию применения данных айтрекера для выявления гиперактивности у детей. Логистическая регрессия с индикаторами отслеживания глаз показала высокие значения чувствительности (0,733), специфичности (0,861) и AUC (0,856). Исследование показало, что метод трекинга глаз может быть использован как дополнительный инструмент для оценки внимания и концентрации у детей. Он также может быть полезен для отслеживания эффективности лечения СДВГ.

Краткий обзор [4] за 2018-2023 гг. оценивает важные недавние исследования, в которых используется отслеживание глаз для задач, связанных с классификацией в области медицины. Основные алгоритмы, обрабатывающие данные о движении глаз, используются для извлечения таких функций, как положение зрачков, продолжительность фиксации и характеристики саккад (количество, продолжительность, скорость, латентный период, вариабельность и т.д.), реже размер зрачков и частоту моргания. Данный анализ показал, что исследователи чаще всего используют алгоритмы машинного обучения, такие как SVM, k-ближайших соседей (KNN), RF и сверточные нейронные сети (CNN) для различения нормальных и патологических состояний, обычно в задачах двоичной классификации, измеряемых точностью (доля правильного прогноза) и AUC (площадь под кривой рабочей характеристики). Точность классификации варьируется в пределах от 52% до 95% в зависимости от типа входных данных, модели классификации и используемых функций.

Цель исследования [5] — проанализировать, можно ли распознавать эмоции с помощью сигнала отслеживания глаз. В качестве признаков были использованы элементы, специфичные для движений глаз, такие как фиксации и саккады. Также были рассчитаны особенности, связанные с диаметром зрачка. В исследовании были протестированы три классификатора: SVM, линейный дискриминантный анализ и KNN. При распознавании эмоций авторы получили максимальную точность классификации 78-80%.

В результате проведенного обзора современных методов решения задач в области медицины на основе сигнала айтрекера и применения методов машинного обучения можно заметить, что наиболее распространенные алгоритмы это SVM и RF, а наиболее применимые признаки движения глаз - положение зрачков, саккады и фиксации. Точность применяемых алгоритмов различна и варьируется от 52 % до 95%.

Цель. Настоящее исследование заключалось в установлении значимых взаимосвязей между когнитивными процессами и параметрами движения глаз человека на основе анализа сигнала айтрекинга методами машинного обучения во время выполнения различных типов когнитивной нагрузки в среде виртуальной реальности.

Материал и методы исследования. В экспериментальной части исследования приняли участие 16 добровольцев-испытуемых обоего пола, в возрасте от 22 до 28 лет, студенты технического вуза.

Для проведения эксперимента использовалась гарнитура виртуальной реальности HTC Vive Pro Eye с функцией распознавания взгляда.

Технология отслеживания глаз Tobii повышает производительность устройства и расширяет возможности пользователя в гарнитуре VIVE профессионального уровня [6].

Для пользователей VR очков и шлемов существует режим SteamVR – универсальная настройка платформы Steam – которая позволяет работать с виртуальной реальностью, изначально разработанная для фирменных гарнитур Vive от HTC, но поддерживающая взаимодействие с устройствами Oculus Rift, Windows Mixed Reality и другими менее популярными гаджетами [7].

UPGRADE VR — это платформа для тренировки когнитивных способностей при помощи простых игровых упражнений, созданных нейropsychологами [8].

Методология исследования. Для проведения исследования и сбора данных были проведены съемы сигналов у 16 условно здоровых добровольцев-испытуемых по циклограмме, представленной на рис. 1. Эксперимент состоял в прохождении испытуемыми серии игр в виртуальной реальности, в ходе которых производится нагрузка пяти когнитивных функций (координация, концентрация, реакция, память, синхронизация), а также включал состояние покоя перед и после тренировки. Длительность эксперимента для одного испытуемого составляла 26 минут.

Запись физиологического сигнала с меткой времени проводилась с использованием Lab Streaming Layer [9] для поддержки мультимодального анализа.

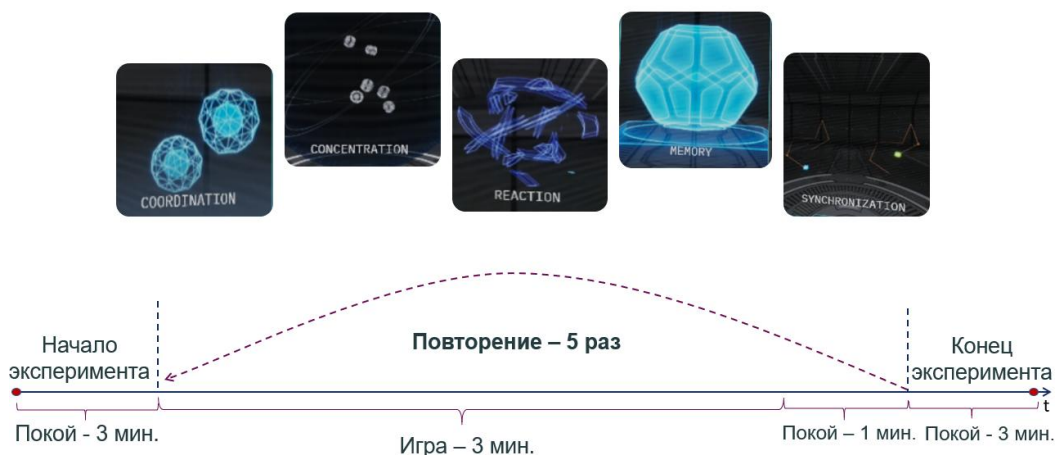


Рис. 1. Циклограмма исследования

Интерполяция и разметка данных. Так как файлы всех 16 добровольцев-испытуемых имели различную частоту дискретизации и длину записи в связи с подготовкой оборудования перед началом эксперимента, то для приведения данных к единой временной сетке была проведена интерполяция с выбранным шагом по времени. В данном случае все данные были приведены к частоте дискретизации 180 Гц.

Разметка данных по стадиям эксперимента проводилась с учетом длины каждого временного отрезка и с конца записи, так как это достоверно зафиксированная точка окончания эксперимента, а данные, полученные до начала эксперимента во время настройки оборудования, были исключены. Также на этом этапе добавляется колонка с меткой о текущем этапе эксперимента, в дальнейшем принятая за обозначение класса (см. таблицу 1).

Таблица 1. Классы функциональных нагрузок

№ класса	Описание
0	Состояние функционального покоя
1	Игра №1 (координация)
2	Игра №2 (концентрация)
3	Игра №3 (реакция)
4	Игра №4 (память)
5	Игра №5 (синхронизация)

Извлечение признаков. Выделение новых признаков является важным аспектом в области анализа данных и машинного обучения. Такие признаки могут содержать дополнительную информацию, которая помогает модели лучше понять закономерности в данных, что может привести к повышению ее точности.

Одними из важнейших признаков для исследования движений глаз являются перемещение, скорость, ускорение, изменение размера зрачка:

1) Перемещение взгляда в трёхмерном пространстве между двумя точками, зафиксированными во времени, можно найти как:

$$r = \sqrt{(x(t_n) - x(t_{n-1}))^2 + (y(t_n) - y(t_{n-1}))^2 + (z(t_n) - z(t_{n-1}))^2},$$

где r – перемещение взгляда (gazeL, gazeR), мм; x – значения координаты по оси X (gazeL_X, gazeR_X), мм; y – значения координаты по оси Y (gazeL_Y, gazeR_Y), мм; z – значения координаты по оси Z (gazeL_Z, gazeR_Z), мм.

2) Скорость этого перемещения найдём:

$$v = \frac{r}{\Delta t},$$

где v – скорость перемещения взгляда, мм/с; s . Таким образом получаем признаки velocityL и velocityR.

3) Далее найдём ускорение:

$$a = \frac{v}{\Delta t},$$

где a – ускорение, мм/с². Здесь получаем признаки accelerationL и accelerationR.

4) Изменение размера зрачка найдём:

$$\Delta d = d_n - d_{n-1},$$

где Δd – изменение размера зрачка (delta_pupilL, delta_pupilR), мм; d_n и d_{n-1} – размеры зрачка в моменты времени t_n и t_{n-1} соответственно, мм.

Фильтрация данных от аномалий и артефактов была проведена методом скользящего среднего, где вместо удаления аномальных данных они заменялись средним значением в пределах скользящего окна.

Исследование данных и формирование признакового пространства.

Сформулируем гипотезу о том, что извлеченные признаки, могут использоваться для формирования признакового пространства.

Проверку гипотезы проведем двумя этапами для классов, описанных в таблице 1:

- 1) проверим значимость различий значений признаков для пар классов;
- 2) проведем ранжирование и отбор признаков по степени различия для разных классов.

Для оценки применимости методов проведем анализ характера распределения извлеченных признаков. Используем одновыборочный критерий Колмогорова-Смирнова для проверки гипотезы о том, что переменная имеет нормальное распределение. Для исследования вычислим средние значения для каждого этапа по каждой переменной для каждого испытуемого и объединим в группы. Уровень значимости выбран $\alpha = 0,05$. В результате проверки гипотеза о нормальном распределении данных отвергается. Данный результат может быть обусловлен тем, что выборка собрана небольшая. Поэтому для последующего исследования значимости признаков воспользуемся непараметрическими тестами.

Используем критерий Фридмана для ранжирования и отбора признаков, которые могут быть включены в признаковое пространство при обработке методами машинного обучения. Ранжирование осуществляется по уровню выраженности признаков при анализе данных для классов, которые описаны в таблице 1.

Для оценки параметра statistic определяем критическое значение по таблице распределения χ^2 . Критическое значение для теста Фридмана при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ составляет около 12,59 [10].

В таблице 2 приведены результаты применения теста Фридмана. Значимыми будут являться те признаки, значения параметра statistic которых превышают критическое значение, а p-value меньше выбранного уровня значимости.

Таблица 2. Результаты применения теста Фридмана

Признаки	statistic	p-value
gazeoriginL_X	14,464	0,025
gazeoriginL_Y	9,509	0,147
gazeoriginL_Z	9,054	0,171
gazeoriginR_X	19,071	0,004
gazeoriginR_Y	7,768	0,256
gazeoriginR_Z	11,732	0,068
gazeL_X	22,554	0,001
gazeL_Y	28,071	0,0001
gazeL_Z	14,250	0,027
gazeR_X	22,982	0,0008
gazeR_Y	28,821	0,0001
gazeR_Z	16,527	0,0112
pupilL	10,902	0,0915
pupilR	16,848	0,0099
eye_opennessL	11,598	0,0716
eye_opennessR	23,169	0,0007
gazeL	24,161	0,0005
gazeR	28,125	0,0001
velocityL	24,161	0,0005
velocityR	28,125	0,0001
accelerationL	24,161	0,0005
accelerationR	28,125	0,0001
delta_pupilL	12,857	0,0454
delta_pupilR	9,563	0,144

Таким образом в список значимых признаков попадают: координата положения взгляда по оси X для левого и правого глаз (gazeoriginL_X, gazeoriginR_X); координаты положения левого и правого зрачков по всем трём координатным осям (gazeL_X, gazeL_Y, gazeL_Z, gazeR_X, gazeR_Y, gazeR_Z); диаметр правого зрачка (pupilR); степень открытости правого глаза (eye_opennessR); перемещение взгляда для левого и правого глаз (gazeL, gazeR); скорость перемещения взгляда для левого и правого глаз (velocity, velocityR); ускорение для левого и правого глаз (acceleration, accelerationR); изменение диаметра левого зрачка (delta_pupilL). Итого нами отобрано 17 признаков из 24.

Воспользуемся критерием Вилкоксона для оценки различий между двумя связными выборками, взятыми из закона распределения, отличного от нормального. Данный тест позволит выявить статистическую значимость различий признаков между играми (когнитивными нагрузками), попарно сравнивая их между собой, без учета состояния функционального покоя. Критическое значение для теста Вилкоксона при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ составляет 29 [11].

Анализ с применением метода Вилкоксона показал, что статистически значимые различия встречаются для пар игр 4 и 5, 1 и 4, 2 и 4, 3 и 5 (см. таблица 1), на основании чего можно сделать вывод, что выделенные признаки могут быть использованы для формирования признакового пространства, которое будет использовано для определения вида нагрузки. Дополнительно, с учетом вышеуказанных признаков, различающих как можно большее количество групп, по критерию Вилкоксона, признаковое пространство было сокращено нами до 10 статистически значимых признаков:

- координата положения взгляда по оси X для левого глаза (gazeoriginL_X);
- координаты положения левого зрачка по осям X, Y (gazeL_X, gazeL_Y);
- координата положения правого зрачка по оси Y (gazeR_Y);
- перемещение взгляда для обоих глаз (gazeL, gazeR);
- скорость перемещения взгляда для обоих глаз (velocity, velocityR);
- ускорение для обоих глаз (acceleration, accelerationR).

Применение методов машинного обучения. Рассмотрим применение методов машинного обучения на базе полученной системы 10 признаков. Так как данные достаточно малочисленные, то применим для обучения наиболее простые модели. Применим следующие алгоритмы: деревья решений, случайный лес, k-ближайших соседей, градиентный бустинг, XGBoost, CatBoost, метод опорных векторов.

Классификация по характеристикам. Начнем со способа извлечения характеристик массивов. Под массивом понимается объем данных по одному признаку за какую-либо стадию эксперимента, и так для каждого испытуемого. Для каждого массива по признаку возьмем среднее значение, максимальное значение и стандартное отклонение величины. Для начала попробуем отличить какую-либо активность от функционального покоя (см. таблицу 3).

Таблица 3. Результаты бинарной классификации методом опорных векторов

Код класса	F1	Accuracy
1	0,375	0,4
2	0,4	0,4
3	0,697	0,7
4	0,451	0,5
5	0,286	0,4

Наиболее существенное различие достигается в сравнении функционального покоя с игрой на функцию реакции.

Теперь проведём бинарную классификацию разными методами и результат запишем в таблицу 4. Здесь ищем отличие функционального покоя от игры №5 (на синхронизацию).

Таблица 4. Результаты бинарной классификации разными моделями

Метод	F1	Accuracy
Decision Tree	0,533	0,571
Random Forest	0,523	0,6
KNN	0,333	0,5
Gradient Boosting	0,495	0,5
CatBoost	0,708	0,714
SVM	0,286	0,286

Для бинарной классификации на предмет различия функционального покоя и активности (игры) удовлетворительный результат показал алгоритм CatBoost (см таблицу 4).

Теперь найдём отличие только между когнитивными функциями, а именно игра №1 (на координацию), игра №4 (на память) и игра №5 (на синхронизацию) и сведём результаты в таблицу 5.

Из таблицы 5 видим, что алгоритмам уже значительно труднее различать большее количество классов. Самый высокий результат показывают алгоритмы XGBoost и Gradient Boosting. Далее попробуем найти отличия между всеми классами (см. таблицу 6).

Таблица 5. Результаты классификации по 3-м классам разными моделями

Метод	F1	Accuracy
Decision Tree	0,345	0,4
Random Forest	0,222	0,2
KNN	0,25	0,2
Gradient Boosting	0,361	0,4
XGBoost	0,361	0,4
CatBoost	0,317	0,3
SVM	0,339	0,4

Таблица 6. Результаты классификации по 6-м классам разными моделями

Метод	F1	Accuracy
Decision Tree	0,166	0,2
Random Forest	0,156	0,2
Gradient Boosting	0,03	0,05
XGBoost	0,3	0,3
CatBoost	0,132	0,15
SVM	0,03	0,1

На основании полученных результатов делаем вывод о том, что при подобном описании данных алгоритмам трудно выделить закономерности и решить задачу многоклассовой классификации. В связи с этим попробуем другой метод построения датасета для обучения моделей.

Многоклассовая классификация. Приведем начальные данные к другому виду. Используем все те же статистически значимые параметры, но на этот раз представим каждый признак каждого этапа каждого испытуемого как строку с изменяющимися во времени значениями параметра. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7. Результаты классификации по 6-м классам

Метод	F1	Accuracy
Decision Tree	0,652	0,656
Random Forest	0,763	0,771
KNN	0,529	0,526
XGBoost	0,757	0,765
SVM	0,748	0,755

Построим и проанализируем матрицу ошибок для многоклассовой классификации (см. рис. 2). Так мы сможем оценить, в каких случаях модель ошибается и насколько часто. Это помогает понять, какие классы модель путает между собой и где возможно улучшить её производительность.

Как мы видим из таблицы 7 наилучший результат по метрикам дает модель Random Forest. Большинство используемых алгоритмов показали точность свыше 70%. Наиболее эффективным оказался алгоритм Random Forest с точностью 77%, что превосходит некоторые рассмотренные в литературном обзоре решения. По матрице ошибок (рис 2) мы можем определить, что модель может путать функциональный покой с играми на функции памяти и синхронизации. Это может быть связано с тем, что данные игры выполняются последними по плану эксперимента и испытуемый к этому моменту может утомиться. Так же одним из объяснений может служить то, что данные игры достаточно спокойные по динамике и характеру.

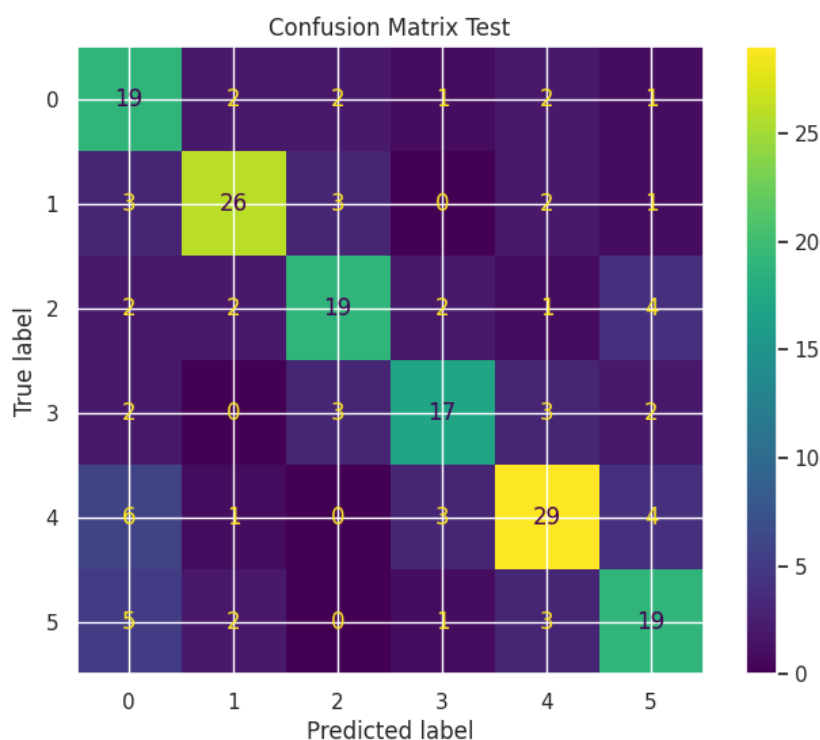


Рис. 2. Матрица ошибок для модели Random Forest

Проектирование модели нейрореабилитации. Согласно рис. 3 пациенты с подтвержденным заболеванием проходят тестирование когнитивных нагрузок в гарнитуре VR: координация, концентрация, реакция, память, синхронизация. Сигнал айттрекинга проходит предобработку, включающую в себя интерполяцию, расчёт дополнительных признаков и фильтрацию от шума. Затем полученный сигнал подается на вход обученной модели. Выявление степени отклонения от нормы в функциональном состоянии мозга позволит с помощью биологической обратной связи (БОС) скорректировать сложность и длительность когнитивного теста, осуществляя тем самым тренировку нарушенной когнитивной функции.

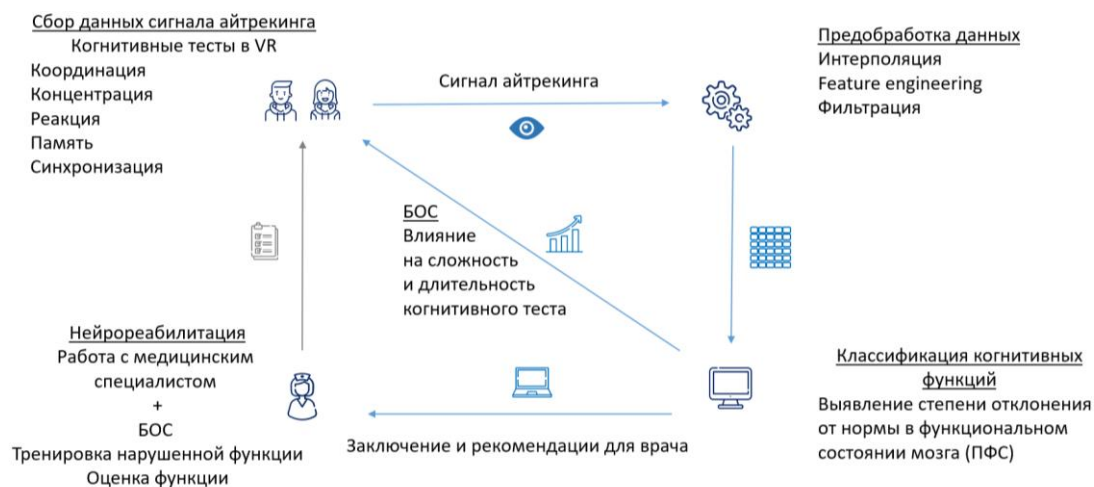


Рис. 3. Модель нейрореабилитации

Медицинский специалист получает от системы заключение и рекомендации, а также визуализацию сигнала отслеживания глаз и оценку нарушенной функции для комплексного подхода к нейрореабилитации.

Заключение. В ходе работы были выполнены все поставленные задачи, включая сбор, разметку и предобработку оригинального датасета, проведение анализа данных, выбор статистически значимых признаков, обучение различных моделей классификации, а также проектирование системы нейрореабилитации.

Для отбора информативных признаков применялись непараметрические критерии Фридмана и Вилкоксона, что позволило выделить характеристики, наиболее связанные с когнитивными процессами.

В исследовании были рассмотрены два подхода к составлению датасета. Первый подход, основанный на использовании агрегированных статистик (средние, максимумы, дисперсии) за определённые временные интервалы, показал ограниченную эффективность для многоклассовой классификации. Для задач бинарной классификации, таких как различение функционального покоя и активности, удовлетворительные результаты продемонстрировал алгоритм CatBoost.

Второй подход, предполагающий использование временных интервалов нагрузки и покоя без предварительного выделения характеристик, показал более высокую точность с использованием алгоритма Random Forest. Однако анализ матрицы ошибок выявил трудности в дифференциации функционального покоя и когнитивных нагрузок на функции памяти и синхронизации.

Предложенная концепция системы нейрореабилитации включает ряд аппаратно-программных блоков: блок виртуальной реальности с набором когнитивных тренировок, блок оценки состояния пациента по заданному алгоритму, блок биологической обратной связи. Система позволяет адаптировать параметры когнитивной нагрузки (сложность и длительность) на основе анализа сигнала айтрекинга, а также предоставляет медицинским специалистам визуализацию данных и рекомендации.

Выводы. В результате проведенного исследования были установлены значимые взаимосвязи между когнитивными процессами и параметрами движения глаз у относительно здоровых молодых людей. Было установлено, что во время выполнения когнитивных тестов («координация», «концентрация», «реакция», «память», «синхронизация») в среде виртуальной реальности фиксируются значимые различия в положении, движении и размере зрачков тестируемого. Это позволило разработать модель классификации когнитивных функций на основе анализа сигналов движения глаз с использованием методов машинного обучения. Точность разработанной модели достигает 77%.

Предложенные решения могут найти применение в разработке эффективных инструментов диагностики и реабилитации когнитивных нарушений пациентов различного профиля.

Нам представляется перспективным развитие следующих направлений работы:

1. Расширение объёма и разнообразия данных для повышения качества классификации.
2. Исследование новых подходов к формированию признаков и их влияния на результаты классификации.
3. Разработка комплексной системы нейрореабилитации и её практическое внедрение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raatikainen, P. [et al.] Detection of developmental dyslexia with machine learning using eye movement data // Array. – 2021. – V. 12. – P. 100087.
2. Merzon, L. [et al.] Eye movement behavior in a real-world virtual reality task reveals ADHD in children // Sci Rep. Nature Publishing Group. – 2022. – V. 12, № 1. – P. 20308.
3. Use of eye tracking to improve the identification of attention-deficit/hyperactivity disorder in children | Scientific Reports [Электронный ресурс]. – URL <https://www.nature.com/articles/s41598-023-41654-9>.
4. Shurupova, M. A. [et al.] Applying the Eye-Tracking Method for the Classification of Neurological Disorders, Mental Diseases, and Speech Impairments Based on Machine Learning: an Overview // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Computational Technologies in Cognitive Science, Genomics and Biomedicine (CSGB). – 2023. – P. 160–164.
5. Tarnowski P. [et al.] Eye-Tracking Analysis for Emotion Recognition // Computational Intelligence and Neuroscience. Hindawi. – 2020. – V. 2020. – P. e2909267.
6. Eye tracking technology for VR - VIVE Pro Eye with Tobi [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tobii.com/products/integration/xr-headsets/device-integrations/htc-vive-pro-eye>.
7. SteamVR в Steam [Электронный ресурс]. – URL: <https://store.steampowered.com/app/250820/SteamVR/>.
8. Upgrade VR в Steam [Электронный ресурс]. – URL: https://store.steampowered.com/app/1731880/Upgrade_VR/.
9. Lab Streaming Layer (LSL) | OpenBCI Documentation [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://openbci.github.io/Software/CompatibleThirdPartySoftware/LSL/>.
10. Как читать таблицу распределения хи-квадрат [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.codecamp.ru/blog/how-to-read-chi-square-distribution-table/>.
11. Таблица критических значений знакового рангового теста Уилкоксона [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.codecamp.ru/blog/wilcoxon-signed-rank-test-critical-values-table/>.

Поступила в редакцию 27.01.2025 г., рекомендована к печати 17.02.2025 г.

A MODEL FOR CLASSIFICATION OF COGNITIVE FUNCTIONS BASED ON HUMAN EYE MOVEMENT ANALYSIS

Kukartseva E.S., Petrenko T.S., Syskov A.M., Borisov V.I.

The aim of the study was to establish significant relationships between cognitive processes and human eye movement parameters. By applying various models of machine learning method in analysing eye movement signal (eye-tracking) during different types of cognitive load, it was possible to develop a classification system for human cognitive functions. To achieve the goal, we reviewed the application of modern machine learning methods for the classification task in psychophysiology; collected, marked up and preprocessed our own dataset of signals captured in a virtual reality environment; analysed the data and identified statistically significant features that determine the relationship with human cognitive processes; trained different classification models; designed a model of a neurorehabilitation system.

Keywords: eye tracking, machine learning, neurorehabilitation, virtual reality, cognitive functions.

Кукарцева Елена Сергеевна

аспирант кафедры информационных технологий и систем управления ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: kukartseva_elena@mail.ru

Kukartseva Elena Sergeevna

Postgraduate student at Department of Information Technologies and Management Systems of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russian Federation, Yekaterinburg.

Петренко Тимур Сергеевич

кандидат медицинских наук, доцент, заведующий лабораторией нейрокогнитивных технологий и нейрореабилитации ЦНИЛ ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет»,
Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: ts.petrenko@mail.ru

Petrenko Timur Sergeevich

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Neurocognitive Technologies and Neurorehabilitation Central Scientific Research Laboratory of the Ural State Medical University,
Russian Federation, Yekaterinburg.

Сысков Алексей Мстиславович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций управления ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: a.m.syskov@urfu.ru

Syskov Aleksey Mstislavovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Radio Electronics and Telecommunications Management of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russian Federation, Yekaterinburg.

Борисов Василий Ильич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем управления ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Российская Федерация, г. Екатеринбург.
E-mail: v.i.borisov@urfu.ru

Borisov Vasilii Ilich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Information Technologies and Management Systems of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russian Federation, Yekaterinburg.

Э Н Е Р Г Е Т И К А И Э Л Е К Т Р О Т Е Х Н И К А

EDN SQUDBQ
УДК 538.945:621.3.05

DOI 10.5281/zenodo.15056735

САМООХЛАЖДАЮЩИЙСЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

© 2025 *Бирюков А.Б., Гридин С.В., Варакута В.В.*

В статье рассматриваются технические аспекты создания низковольтного самоохлаждающегося сверхпроводящего кабеля. Предложены базовые технические характеристики, необходимые для проектирования и конструирования кабеля, а также выполняются упрощенные расчеты параметров, необходимых для определения его эффективности. Подобраны технологии, которые могут быть использованы при производстве данного кабеля.

Ключевые слова: сверхпроводящий элемент, силовая часть, холодопроизводительность, охлаждающий микрослой, ток охлаждения, электрическая мощность, коэффициент термоЭДС, ёмкость, диодный слой, полевой транзистор.

Введение. Исторически так сложилось, что на территории Донбасса часть инфраструктуры городского хозяйства – это добывающие и энергогенерирующие предприятия топливно-энергетического комплекса, расстояние между которыми, как правило, до нескольких десятков километров. Глубина разработки более 50% шахт Донбасса превышает 700 м, в некоторых случаях она достигает 1400 м и более. Инфраструктура поверхностного и подземного комплекса современной шахты тоже имеет большую протяжённость. Поэтому длина линий электропередач (ЛЭП) от первичного источника (электрической станции), до шахты (конечного электропотребителя, участвующего в процессе угледобычи), может достигать сто и более километров [1]. Кроме, того постоянно растёт энерговооружённость угледобывающего оборудования.

Например, в настоящее время с целью обеспечения импортозамещаемых поставок очистных комбайнов фирм Германии, США, Польши, используемых в настоящее время на шахтах Российской Федерации, для продуктивной и безопасной отработки пластов мощностью 2,5–5,5 м, ГБУ «ДОНУГЛЕМАШ», ГБУ «НИИВЭ», ГУ «АВТОМАТГОРМАШ им. В.А. Антипова», при тесном сотрудничестве в решении вопросов безопасности и промсанитарии с ГУ «МАКНИИ», в соответствии утвержденным ГКНТ ДНР Техническим заданием ведут разработку конструкторской документации на очистной комбайн КДК1000 с автоматизированным частотно-регулируемым приводом бесцепной системы подачи. Суммарная установленная мощность электропривода КДК1000 с электродвигателями блоков резания ЭКВ5,5-550В-У5 составляет 1000 кВт подачи под номинальное напряжение 3300 В. Всё это приводит к значительным потерям электроэнергии при её транспортировке в ЛЭП, которые могут превышать нормативные 10%, что негативно сказывается на себестоимости добываемого угля. Повышение питающего напряжения горношахтного электрооборудования не приводит к решению данной проблемы, так как ужесточаются требования электробезопасности. В горных выработках и в поверхностном складском комплексе полезного ископаемого ужесточаются требования взрывозащиты электрооборудования [2], что также повышает себестоимость добытого полезного ископаемого.

В то же время, низковольтные самоохлаждающиеся сверхпроводящие кабели имеют значительный потенциал для трансформации энергетической инфраструктуры и представляют собой решение многих проблем, связанных с потерями энергии и затратами на обслуживание, что делает их особенно актуальными в свете глобальных усилий по переходу на устойчивую энергетику и сокращению углеродного следа. Поэтому разработка ЛЭП постоянного тока с высоким К.П.Д. электропередачи, выполненных на базе сверхпроводящего кабеля, который может стать эффективной альтернативой традиционным кабелям, является актуальной.

Цель статьи сформировать базовые технические предложения необходимые для проектирования и конструирования низковольтного, сверхпроводящего, самоохлаждающегося кабеля (ССК) постоянного тока, с высоким (не менее 99%) К.П.Д. электропередачи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ преимуществ имеющихся систем электропередачи постоянного тока;
- проанализировать возможные варианты структуры ССК;
- используя упрощённые расчётные зависимости определить, геометрические и энергетические характеристики, необходимые для дальнейшего проектирования силовой части и охлаждающего контура ССК.

В мировой электроэнергетике на сегодняшний день эксплуатируется около 100 линий и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ). Их основные преимущества:

- возможность осуществлять несинхронную связь между энергосистемами;
- можно безынерционно изменять направление и величину потока энергии;
- постоянный ток обеспечивает меньшие колебания и более высокую стабильность при передаче электроэнергии по сравнению с переменным током;
- нет ограничений передаваемой мощности по условиям нарушения устойчивости при использовании протяженных высоковольтных линий (ВЛ);
- меньше, примерно в 1,5 раза, зона отчуждения для ВЛ ППТ по сравнению с ВЛ переменного тока;
- системы на основе постоянного тока могут быть более компактными в сравнении с традиционными системами переменного тока;
- в протяжённых ВЛ ППТ потери электроэнергии могут быть снижены до 3%, поскольку постоянный ток позволяет значительно снизить потери на нагрев проводников, особенно при больших расстояниях;
- удобное интегрирование с современными возобновляемыми источниками, системы на основе постоянного тока идеально подходят для подключения солнечных и ветряных электростанций;
- нет альтернативы при преодолении водных преград [3].

Постановка задачи. Для первичного анализа рассмотрим структурную схему ССК, представленную на рис. 1. Принимаем в режиме сверхпроводимости следующие параметры: силовая часть самоохлаждающегося сверхпроводящего кабеля (ССК) – силовая часть серийно выпускаемого Nb-Ti кабеля в каркасе из меди; диаметр кабеля $d_{\text{кабеля}}=15 \cdot 10^{-3}$ м, длина $l=100$ м, диаметр сверхпроводящего волоска $d_{\text{волоска}}=6 \cdot 10^{-6}$ м, число волосков в жиле $n=6300$, число жил в кабеле $n_{\text{ж}}=36$, необходимая температура на оси ССК – $t_0=7\text{K}$. Тепловой поток отводится в стационарном режиме.

Электроизоляционные слои – плёнка из поликарбоната толщиной $\delta=2\cdot 10^{-6}$ м, электрическая прочность которой $20\cdot 10^6$ В/м; $\lambda_{\text{поликарб.}}=0,22$ Вт/м·К – коэффициент теплопроводности поликарбоната при криогенных температурах; $I_c=10^4$ А – суммарный критический ток сверхпроводящих нитей кабеля; $U=36$ В – напряжение источника питания силовой части; $\rho_{\text{Cu}}=0,05\cdot 10^{-9}$ Ом·м – удельное остаточное электрическое сопротивление меди при криогенных температурах; $\lambda_{\text{Cu}}=500$ Вт/м·К – коэффициент теплопроводности меди при криогенных температурах.

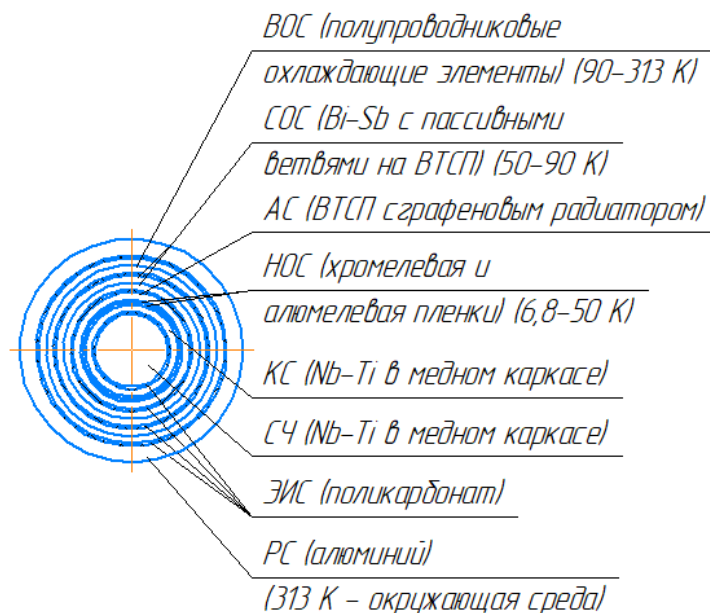


Рис. 1. Структурная схема ССК:

АС – анодный слой; ВОС – высокотемпературные охлаждающие слои;
ВТСП – высокотемпературный сверхпроводник; КС – катодный слой;
НОС – низкотемпературный охлаждающий слой; РС – радиаторный слой;
СОС – среднетемпературные охлаждающие слои; СЧ – силовая часть;
ЭИС – электроизоляционный слой

Очевидно, что при поддержании эффекта сверхпроводимости конструкции силовой части ССК в стационарном режиме нет объёмного тепловыделения, т.е. $q_0=0$, поскольку его внутреннее сопротивление приближается к нулю (но не может быть точно равным нулю). Рассмотрим охлаждающий контур (ОК), состоящий из большого количества ОС.

Расчет силовой части ССК. Мнимое сопротивление силовой части ССК:

$$R_{\text{mim}} = \frac{U}{I_c} = \frac{36}{1\cdot 10^4} = 3,5\cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Площадь сверхпроводящего (СП) волоска:

$$S_{\text{волоска}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{волоска}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (6\cdot 10^{-6})^2}{4} = 2,87\cdot 10^{-12} \text{ м}^2.$$

Площадь СП элемента в сечении силовой части кабеля:

$$S_{\text{СП}} = S_{\text{волоска}} \cdot n \cdot n_{\text{ж}} = 2,87\cdot 10^{-12} \cdot 6300 \cdot 36 = 6,5\cdot 10^{-7} \text{ м}^2.$$

Площадь медного каркаса в сечении силовой части кабеля:

$$S_{\text{карк.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{кабеля}}^2}{4} - S_{\text{СП}} = \frac{3,14 \cdot (15 \cdot 10^{-3})^2}{4} - 6,5 \cdot 10^{-7} = 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Электрическое сопротивление медного каркаса силовой части кабеля:

$$R_{\text{карк}} = \frac{\rho_{\text{Cu}} \cdot l}{S_{\text{карк.}}} = \frac{0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{1,76 \cdot 10^{-4}} = 280 \text{ Ом}.$$

Ток каркаса силовой части:

$$I_{\text{карк.}} = \frac{U}{R_{\text{карк}}} = \frac{36}{280} = 0,129 \text{ А}.$$

Объёмное тепловыделение силовой части кабеля:

$$Q_{\text{СП}} = I_{\text{карк.}}^2 \cdot R = 0,129^2 \cdot 280 = 4,66 \text{ Вт}.$$

Удельный тепловой поток, выделяемый 1 п.м. силовой части кабеля:

$$q_v = \frac{Q_{\text{СП}}}{l} = \frac{4,66}{100} = 0,047 \text{ Вт/м}.$$

Температура поверхности силовой части кабеля:

$$t_c = t_0 - \frac{q_v \cdot \left(\frac{d_{\text{кабеля}}}{2}\right)^2}{4 \cdot \lambda_{\text{Cu}}} = 7 - \frac{0,047 \cdot \left(\frac{15 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2}{4 \cdot 500} = 6,999 \text{ К}.$$

Необходимая плотность теплового потока, отводимого с поверхности 1 п.м. силовой части кабеля для поддержания эффекта сверхпроводимости:

$$q_1 = \frac{q_v \cdot d_{\text{кабеля}}}{4} = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,047}{4} = 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2.$$

Температура наружной поверхности электроизоляционного слоя кабеля:

$$t_{1н} = t_c - \frac{q_1 \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta}{d_{\text{кабеля}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{полик.}}} = 6,999 - \frac{1,76 \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{15 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-3}}\right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,22} = 6,999 \text{ К}.$$

Для охлаждения конструкции силовой части и катодного слоя кабеля ниже 50 К используем термоэлектрические слои из хромелевой и алюмелевой плёнки.

Элементарный охлаждающий микро-слой №1 (криогенный режим).

Принимаем следующие параметры термоэлектрического слоя хромель-алюмель:

$\alpha_{\text{Х-А}} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$ – коэффициент термоЭДС термоэлектрического слоя; $\lambda_{\text{Х-А ср.}} = 17$

Вт/м·К – средний коэффициент теплопроводности термоэлектрического слоя при криогенных температурах; $\delta_{\text{ТЭ}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – толщина термоэлектрического слоя;

$\delta_{\text{Х}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – толщина хромелевой плёнки; $\delta_{\text{А}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – толщина алюмелевой

плёнки; $\rho_{\text{Х}} = 6,8 \cdot 10^{-7} \text{ Ом·м}$ – удельное сопротивление хромеля; $\rho_{\text{А}} = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом·м}$ – удельное сопротивление алюмеля.

Параметры катодного слоя свинца: $\lambda_{pb} = 24$ Вт/м·К – коэффициент теплопроводности слоя свинца; $\delta_{pb} = 2 \cdot 10^{-3}$ м – толщина слоя свинца; $I_{cPB} = 178 \cdot 10^6$ А/м² – критический ток для свинца.

Для гарантированного обеспечения эффекта сверхпроводимости силовой части кабеля и катодного слоя принимаем $T_{X1} = 6,8$ К – температура наружной поверхности катодного слоя.

Холодопроизводительность элементарного, охлаждающего микрослоя (ОС) №1 равна величине плотности теплового потока q_1 , отводимого с поверхности электроизоляционного слоя, необходимой для поддержания эффекта сверхпроводимости:

$$q_1 = \alpha_{X-A} \cdot T_{X1} \cdot I_{ox} - 0,5 \cdot I_{ox}^2 \cdot R_1 - \lambda_1 \cdot (T_{Г1} - T_{X1}), \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

В формуле (1) суммарное электрическое сопротивление ОС №1 R_1 рассчитывается как сумма электрического сопротивления плёнки хромели r_{1X} и электрического сопротивления плёнки алюминия r_{1A} , приведенных к 1 п.м. кабеля, соответственно:

$$R_1 = r_{1X} + r_{1A}, \text{ Ом}; \quad r_{1X} = \frac{\rho_X \cdot \delta_X}{\pi \cdot d_1}, \text{ Ом}; \quad r_{1A} = \frac{\rho_A \cdot \delta_A}{\pi \cdot d_1}, \text{ Ом},$$

где d_1 – диаметр ОС №1:

$$d_1 = d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta_{pb} + 2 \cdot \delta = 15 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 19,004 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Тогда:

$$r_{1X} = \frac{6,8 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 19,004 \cdot 10^{-3}} = 1,14 \cdot 10^{-11}, \text{ Ом};$$

$$r_{1A} = \frac{3,3 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 19,004 \cdot 10^{-3}} = 0,55 \cdot 10^{-11}, \text{ Ом};$$

$$R_1 = 1,14 \cdot 10^{-11} + 0,55 \cdot 10^{-11} = 1,69 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}.$$

Для снижения величины магнитного поля в силовой части кабеля, что ведёт к повышению значения суммарного критического тока в режиме сверхпроводимости, ток охлаждения в катодном слое принимаем равным и противоположным по направлению критическому току силовой части кабеля:

$$I_{ox} = I_c = 1 \cdot 10^{-4} \text{ А}.$$

Ток охлаждения, приведенный к 1 п.м. кабеля:

$$I_{oxпр.} = \frac{I_{ox}}{l} = \frac{1 \cdot 10^4}{100} = 100 \text{ А}.$$

Величина интегрального эффекта снижения температуры ΔT_1 при работе первого термоэлектрического слоя ОС №1 вычисляется по формуле:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{\lambda_1} \cdot (\alpha_{X-A} \cdot I_{ox} \cdot T_{X1} - 0,5 \cdot I_{ox}^2 \cdot R_1 - q_1), \quad (2)$$

где λ_1 – средний коэффициент теплопроводности катодного и ОС №1 при криогенных температурах:

$$\lambda_1 = \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot \delta_{pb}}{(d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta)}\right) + \ln\left(\frac{d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot \delta_{pb} + 2 \cdot \delta_{TЭ}}{(d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot \delta_{pb})}\right)}{\frac{1}{\lambda_{pb}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot \delta_{pb}}{(d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta)}\right) + \frac{1}{\lambda_{X-A \text{ ср.}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot \delta_{pb} + 2 \cdot \delta_{TЭ}}{(d_{\text{кабеля}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot \delta_{pb})}\right)} = 24,844 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Отсюда:

$$\Delta T_1 = (1/24,844) \cdot (4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 6,8 - 0,5 \cdot 100^2 \cdot 1,69 \cdot 10^{-11} - 1,76 \cdot 10^{-4}) = 0,0001215551 \text{ К}.$$

Температура наружной (горячей) поверхности ОС №1 $T_{Г1}$:

$$T_{Г1} = T_{Х1} + \Delta T_1 = 6,8 + 0,0001215551 = 6,8001215551 \text{ К}.$$

Плотность теплового потока, отводимого с горячей поверхности ОС №1, необходимая для поддержания режима сверхпроводимости:

$$q_{1Г} = \alpha_{X-A} \cdot T_{Г1} \cdot I_{ox} + 0,5 \cdot I_{ox}^2 \cdot R_1 - \lambda_1 \cdot \Delta T_1 =$$

$$= 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 6,824 \cdot 100 + 0,5 \cdot 100^2 \cdot 1,69 \cdot 10^{-11} - 24,884 \cdot 0,0001215551 = 0,000176226 \text{ Вт/м}^2.$$

Элементарный охлаждающий микрослой №2 (криогенный режим). Холодопроизводительность ОС №2 равна плотности теплового потока q_2 , отводимого с горячей поверхности ОС №1:

$$q_2 = q_{1Г} = 0,000176226 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура холодной поверхности ОС №2 равна температуре горячей поверхности ОС №1:

$$T_{Х2} = T_{Г1} = 6,8001215551 \text{ К}.$$

Тогда:

$$\Delta T_2 = \frac{1}{\lambda_{X-A \text{ ср.}}} \cdot (\alpha_{X-A} \cdot I_{ox} \cdot T_{Х2} - 0,5 \cdot I_{ox}^2 \cdot R_1 - q_2) =$$

$$= 1/17 \cdot (4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 6,8001215551 - 0,5 \cdot 100^2 \cdot 1,69 \cdot 10^{-11} - 0,0001762261) = 0,0001776321 \text{ К}.$$

Результаты исследования. Дальнейшие результаты расчёта ОС из хромель-алюмелевых плёнок сводим в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты расчёта ОС из хромель-алюмелевых плёнок

$I_{ox \text{ пр.}} = 100 \text{ А}, R_n = 1,69 \cdot 10^{-11}$					
ОС №	q , Вт/м ²	q_r , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_r
1	0,000176	0,0001762261	6,8	0,000122	6,8001221
2	0,000176226	0,000176479	6,80012156	0,000177632	6,80029919
3	0,000176479	0,000176731	6,80029919	0,000177622	6,80047681
4	0,000176731	0,000176984	6,80047681	0,000177612	6,80065442
5	0,000176984	0,000177236	6,80065442	0,000177602	6,80083202
6	0,000177236	0,000177489	6,80083202	0,000177592	6,80100961
7	0,000177489	0,000177741	6,80100961	0,000177582	6,80118719
8	0,000177741	0,000177994	6,80118719	0,000177573	6,80136476
9	0,000177994	0,000178246	6,80136476	0,000177563	6,80154232
10	0,000178246	0,000178499	6,80154232	0,000177553	6,80171987

Строим график (рис. 2) и находим зависимость $\Delta T(n)$, где n - №ОС.

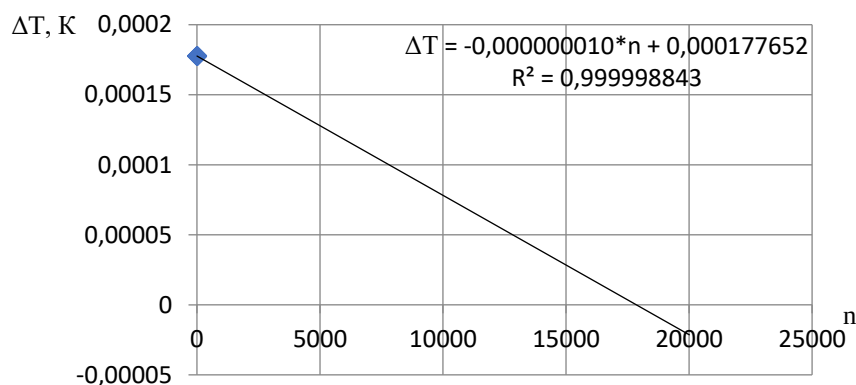


Рис. 2. Зависимость интегрального эффекта снижения температуры ΔT_n от n

Из графика на рис. 2 видно, что при увеличении числа ОС величина ΔT уменьшается, что не позволяет достичь необходимого охлаждающего эффекта.

Рассмотрим случай, когда ΔT поддерживается постоянной за счёт изменения $I_{\text{ох пр.}}$ и R_n . Результаты расчёта сводим в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчёта ОС при постоянной ΔT

ОС №	q , Вт/м ²	q_r , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_r , К	$I_{\text{ох пр.}}$, А	R , Ом	$\Delta I_{\text{ох пр.}}$, А
1	0,000176	0,000176	6,8	0,0001216	6,8001216	100	$1,69 \cdot 10^{-11}$	0
2	0,0001762	0,0011763	6,8001216	0,0001747	6,8002698	100	$1 \cdot 10^{-8}$	0
3	0,0011763	0,0013519	6,8002698		6,8004445	132,46865		32,468650
4	0,0013519	0,0015430	6,8004444		6,8006192	138,20161		5,732960
5	0,0015430	0,0017518	6,8006192		6,8007939	144,45362		6,252010
6	0,0017518	0,0019808	6,8007939		6,8009686	151,2986		6,844980
7	0,0019808	0,0022332	6,8009686		6,8011433	158,8252		7,526600
8	0,0022332	0,0025127	6,8011433		6,8013180	167,14065		8,315450
9	0,0025127	0,0028239	6,8013180		6,8014927	176,37609		9,235440
10	0,0028239	0,0031726	6,8014927		6,8016674	186,69345		10,317360

Строим график и находим зависимость характеристик процесса охлаждения от n (рис. 3). Из графика на рис. 3 видно, что для охлаждения наружной поверхности катодного слоя от 50 К до 6,8 К необходимое количество ОС составит:

$$n = \frac{T_r - 6,79992038}{0,00017470} = \frac{50 - 6,79992038}{0,00017470} = 247282.$$

Из графиков, представленных на рис. 4 и 5, видно, что холодопроизводительность достигнет величины:

$$q = 0,00001116 \cdot n^2 + 0,00008872 \cdot n + 0,00081501 =$$

$$= 0,00001116 \cdot 247282^2 + 0,00008872 \cdot 247282 + 0,00081501 = 682438 \text{ Вт/м}^2,$$

а необходимый охлаждающий ток, циркулирующий в низкотемпературном охлаждающем контуре, составит:

$$I_{\text{ох пр.}} = 0,3768 \cdot n^2 + 2,7918 \cdot n + 120,88 =$$

$$= 0,3768 \cdot 247282^2 + 2,7918 \cdot 247282 + 120,88 = 23 \cdot 10^9 \text{ А.}$$

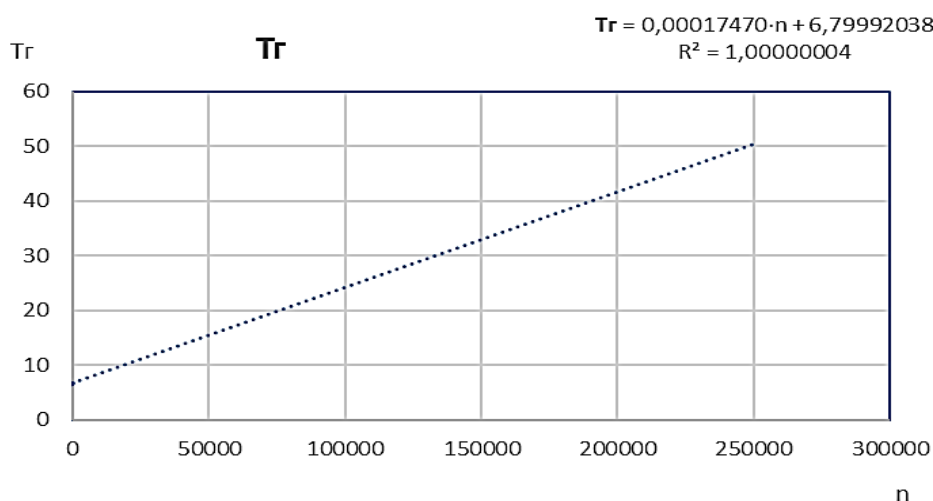


Рис. 3. Зависимость характеристик процесса охлаждения от n

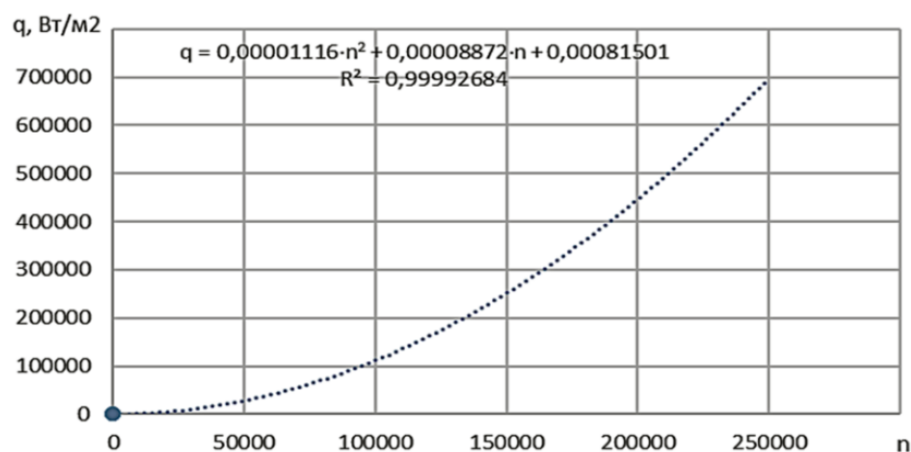


Рис. 4. Зависимость холодопроизводительности от количества слоев ОС

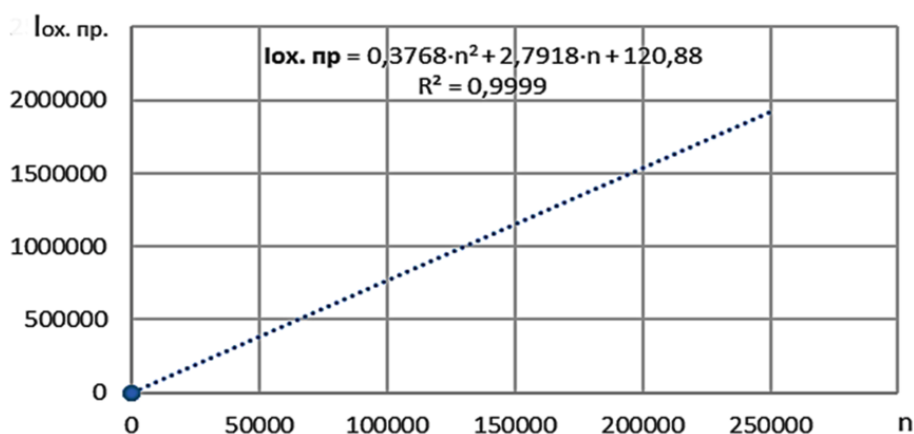


Рис. 5. Зависимость величины охлаждающего тока от количества слоев ОС

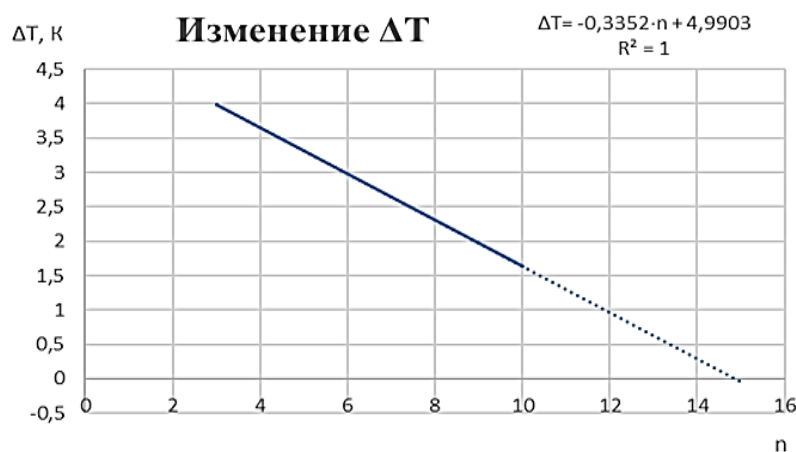
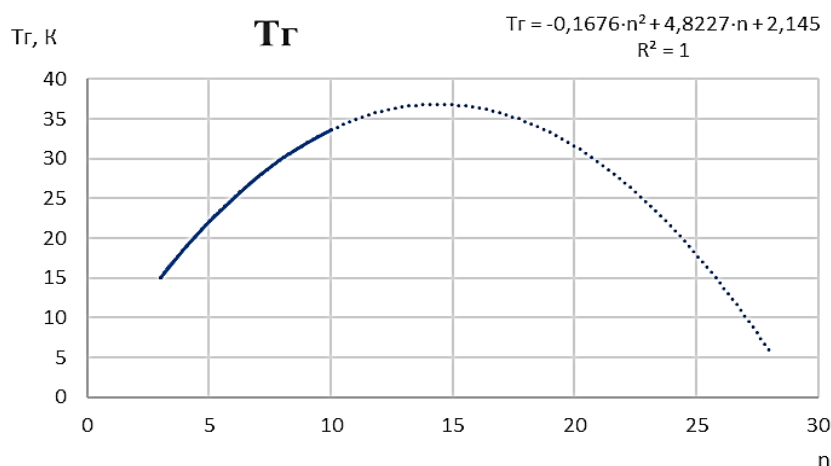
Для снижения величин холодопроизводительности от охлаждающего тока подберём $I_{ox \text{ пр.}}$ и R_n таким образом, чтобы величина n не превышала 20. Результаты расчёта сводим в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты расчета величины охлаждающего тока

ОС №	q , Вт/м ²	q_{Γ} , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_{Γ} , К	$I_{\text{ох пр.}}$, А	R , Ом
1	0,000176	0,000176	6,8	0,000122	6,800122	100	$1,69 \cdot 10^{-11}$
2	0,000176	54,162895	6,800122	4,3200	11,120122	2386972,1715	$1 \cdot 10^{-12}$
3	54,163	104,565587	11,120122	3,984845	15,104967		
4	104,566	151,208251	15,104967	3,649690	18,754656		
5	151,208	194,090889	18,754656	3,314535	22,069191		
6	194,091	233,213499	22,069191	2,979380	25,048571		
7	233,213	268,576081	25,048571	2,644225	27,692796		
8	268,576	300,178636	27,692796	2,309070	30,001865		
9	300,179	328,021164	30,001865	1,973915	31,975779		
10	328,021	352,103663	31,975779	1,638759	33,614539		

Строим график и находим зависимость характеристик процесса охлаждения от n . Из графиков, представленных на рис. 6 и 7, видно, что при одноступенчатой схеме охлаждения для поддержания эффекта сверхпроводимости конструкции силовой части и катодного слоя (T_{Γ} внешней поверхности катодного слоя поддерживать равной 6,8 К), охлаждение нужно осуществлять от температуры при $n=14$:

$$T_{\Gamma} = -0,1676 \cdot n^2 + 4,8227 \cdot n + 2,145 = -0,1676 \cdot 14^2 + 4,8227 \cdot 14 + 2,145 = 36,8132 \text{ К.}$$

Рис. 6. Зависимость характеристик процесса охлаждения от n Рис. 7. Зависимость температуры T_{Γ} от n

Для поддержания эффекта сверхпроводимости при охлаждении от 50 К необходимо добавить ещё 4 ОС (таблица 4).

Таблица 4. Результаты расчета величины охлаждающего тока для добавленных слоев

ОС №	q , Вт/м ²	q_r , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_r , К	$I_{\text{ох пр.}}$, А	R , Ом	$\Delta I_{\text{ох пр.}}$, А
15	410,8	472,628	36,813	4,102	40,916	2800000	$1 \cdot 10^{-12}$	413027,8285
16	472,628	528,387	40,916	3,6413	44,557			
17	528,387	578,078	44,557	3,180	47,737			
18	578,078	621,699	47,737	2,719	50,456			

При этом электрическая мощность, потребляемая низкотемпературным контуром охлаждения, составит:

$$N_{\text{эл.ох.}} = I_{\text{ох.пр.}} \cdot R \cdot n \cdot l = 2800000^2 \cdot 1 \cdot 10^{-12} \cdot 18 \cdot 100 = 14112 \text{ Вт.}$$

Э.Д.С. низкотемпературного охлаждающего контура составит:

$$E_{\text{ох.0}} = I_{\text{ох.пр.}} \cdot R = 2800000^2 \cdot 1 \cdot 10^{-12} = 7,84 \text{ В.}$$

Определим характеристики процесса охлаждения в низкотемпературном контуре с одним ОС для ССК длиной 100 м (таблица 5).

Таблица 5. Характеристики процесса охлаждения в низкотемпературном контуре с одним ОС для ССК длиной 100 м

q , Вт/м ²	q_r , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_r , К	$I_{\text{ох пр.}}$, А	R , Ом	$N_{\text{эл.ох.}}$, Вт	$E_{\text{ох.0}}$, В	$N_{\text{эл.}}$, Вт	η , %
0,000176	5076,185	6,8	44,951	51,751	$24 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-14}$	576	$0,24 \cdot 10^{-6}$	$360 \cdot 10^3$	99,84

При этом передаваемая кабелем электрическая мощность равна:

$$N_{\text{эл.}} = U \cdot I_c = 36 \cdot 10^4 = 360 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

К.П.Д низкотемпературного охлаждающего контура с одним ОС стометрового ССК:

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{\text{эл.ох.}}}{N_{\text{эл.}}} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{576}{360 \cdot 10^3} \right) \cdot 100 = 99,84\%.$$

Определим характеристики процесса охлаждения в стометровом ССК с одним ОС при условии нагрева наружной поверхности ОС до 313 К (40°C) (таблица 6).

Таблица 6. Характеристики процесса охлаждения в низкотемпературном контуре с одним ОС для ССК длиной 100 м при условии нагрева наружной поверхности ОС до 40°C

q , Вт/м ²	q_r , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_r , К	$I_{\text{ох пр.}}$, А	R , Ом	$N_{\text{эл.ох.}}$, Вт	$E_{\text{ох.0}}$, В	$N_{\text{эл.}}$, Вт	η , %
0	235053	6,8	306,22	313,02	$16,3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-15}$	2608	$0,16 \cdot 10^{-6}$	$360 \cdot 10^3$	99,73

При этом толщина ОС – $\delta_{\text{ОС}} = \delta_{\text{ГЭ}} = 2 \cdot 10^{-7}$ м, а площадь ОС, приведенная к 1 п/м ССК:

$$S_{\text{ОС пр.}} = \frac{(\rho_x + \rho_A) \cdot \delta_{\text{ОС}}}{R} = \frac{(6,8 \cdot 10^{-7} + 3,3 \cdot 10^{-7}) \cdot 2 \cdot 10^{-7}}{1 \cdot 10^{-15}} = 202 \text{ м}^2.$$

Как, было сказано выше, при поддержании эффекта сверхпроводимости конструкции силовой части ССК в стационарном режиме нет объёмного тепловыделения, а процесс термоэлектрического охлаждения высокоамперный и низковольтный.

Электрическая мощность $N_{эл.охл.}$, затрачиваемая на этот процесс, не зависит от электрической мощности $N_{эл.}$, передаваемой ССК. $N_{эл.охл.}$ зависит от минимальной критической температуры материала сверхпроводящих элементов, присутствующих в конструкции ССК, а также от температуры наружной поверхности ОС и длины кабеля L . Это приводит к необходимости выполнить конструкцию силовой части ССК по многослойной биполярной коаксиальной схеме (рис. 8).

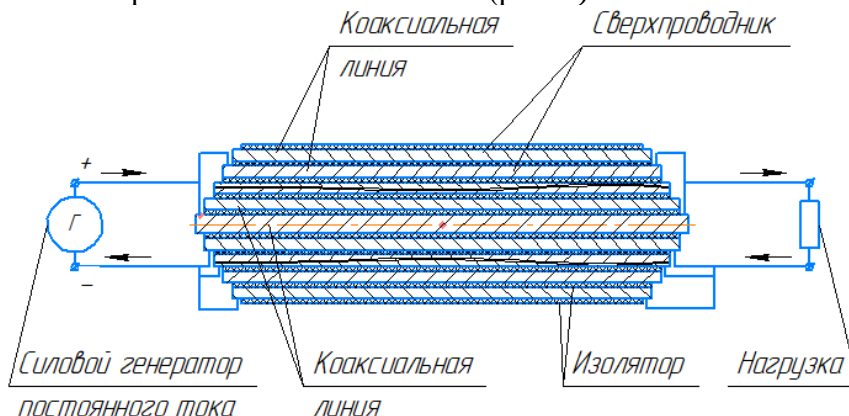


Рис. 8. Конструкция силовой части ССК по многослойной биполярной коаксиальной схеме

Определим характеристики процесса охлаждения в стометровом ССК с одним ОС при условии нагрева наружной поверхности ОС до 313 К (40°C) (таблица 7), материал сверхпроводящих элементов силовой части которого выполнен из ВТСП с критической температурой сверхпроводящего перехода выше 60 К. ОС может представлять собой активную криогенную термоэлектрическую плёнку из Bi-Sb с п-проводимостью ($\delta_{ОС} = \delta_{ТЭ} = 2 \cdot 10^{-7}$ м), нанесённую на пассивную ветвь, выполненную из пленки ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, плотность критического тока $j_{кр}$ ВТСП = $5 \cdot 10^{10}$ А/м², критическая температура сверхпроводящего перехода которой составляет 90 К. Коэффициент термоЭДС термоэлектрического слоя из Bi-Sb $\alpha_{Bi-Sb} = 230 \cdot 10^{-6}$ В/К, удельное электрическое сопротивление криогенной термоэлектрической плёнки из Bi-Sb $\rho_{Bi-Sb} = 3,57 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, коэффициент теплопроводности $\lambda_{Bi-Sb} = 3,6$ Вт/м·К [4].

Таблица 7. Характеристики процесса охлаждения в низкотемпературном контуре с одним ОС из Bi-Sb для ССК длиной 100 м при условии нагрева наружной поверхности ОС до 40°C

q , Вт/м ²	q_r , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_r , К	$I_{ох}$ пр., А	R , Ом	$N_{эл.ох.}$, Вт	$E_{ох.0}$, В	$N_{эл.}$, Вт	η , %
0	3889	59,5	253,49	313,99	$6,67 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-10}$	44,49	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$360 \cdot 10^3$	99,987

Необходимая площадь ОС, приведенная к 1 п/м ССК, составляет не менее:

$$S_{ОС пр.} = \frac{\rho_{Bi-Sb} \cdot \delta_{ОС}}{R} = \frac{3,57 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-7}}{1 \cdot 10^{-10}} = 0,00714 \text{ м}^2.$$

фактическая площадь ОС приведенная к 1 п/м ССК:

$$S_{ОС ф.пр.} = \pi \cdot d_{кабеля} = 3,14 \cdot 0,015 = 0,0471 \text{ м}^2,$$

фактическое сопротивление ОС, приведенное к 1 п/м ССК, составит:

$$R_{ф.пр.} = R_{ОС} = \frac{\rho_{Bi-Sb} \cdot \delta_{ОС}}{S_{ОС пр.}} = \frac{3,57 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-7}}{0,0471} = 1,52 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}.$$

Фактические характеристики процесса охлаждения представлены в таблице 8.

Таблица 8. Фактические характеристики процесса охлаждения

q , Вт/м ²	q_{Γ} , Вт/м ²	T , К	ΔT , К	T_{Γ} , К	$I_{\text{ох пр.}}$, А	R , Ом	$N_{\text{эл.ох.}}$, Вт	$E_{\text{ох.0}}$, В	$N_{\text{эл.}}$, Вт	η , %
0	3890	59,5	253,54	313,04	$6,67 \cdot 10^4$	$1,52 \cdot 10^{-11}$	6,76	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$360 \cdot 10^3$	99,998

Величина охлаждающего тока, протекающего через ОС, значительна, поэтому, $I_{\text{ох.пр.}}$ генерируем в виде импульсов, применив ёмкостной трансформатор, встроенный в конструкцию ССК с внешним источником питания охлаждающего контура (ОК) и внешним источником управляющих импульсов слоя ключа, вынесенным за пределы конструкции ССК. Принципиальная электрическая схема ОК, приведенная к 1 п/м ССК, представлена на рис. 9.

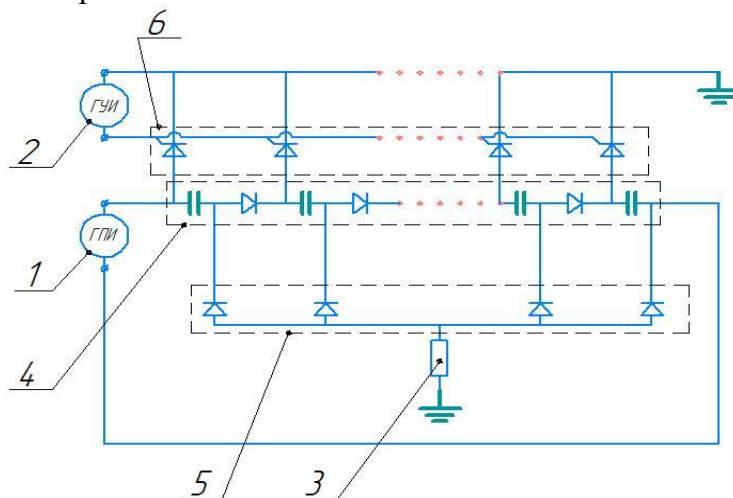


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема ОК, приведенная к 1 п/м ССК:

- 1 – генератор прямоугольных импульсов (ГПИ);
2 - генератор управляющих импульсов тиристорным слоем (ГУИ);
3 – ОС; 4 – блок конденсаторов с диодными слоями; 5 – диодный слой ОС; 6 – слой ключа

Рассмотрим работу ОК, определим характеристики электрической схема ОК и параметры её элементов. Внешний источник питания охлаждающего контура 1 представляет собой вынесенный за пределы конструкции ССК генератор прямоугольных импульсов (ГПИ). При появлении на его выходе Э.Д.С. ($E_{\text{ГПИ}}$), блок конденсаторов (БК) 4 заряжается. Ёмкости БК заряжаются последовательно, что обеспечивает низкий зарядный ток. После окончания заряда БК Э.Д.С. на выходе ГПИ снижается до нуля, а внешним источником управляющих импульсов (ГУИ) 2, на управляющий слой слоя ключа (СК) 6, подаётся управляющий импульс. СК открывается и БК разряжается, после чего процесс повторяется. СК, диодные слои БК и диодный слой 5 обеспечивают последовательный заряд ёмкостей БК непосредственно от ГПИ и параллельный разряд ёмкостей БК через ОС 6, что позволяет получить необходимую величину $I_{\text{ох.пр.}}$.

Диодный слой 5 может быть выполнен в виде Trench структуры диода Шоттки толщиной $\delta_{\text{ш}} = 7 \cdot 10^{-6}$ м, с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{\text{ш}} = 0,02$ Ом·м. Так как он напыляется непосредственно на ОС, принимаем его площадь, приведенную к 1 п/м ССК, равной площади ОС [8]. Слой ключа может быть выполнен в виде тиристорной структуры, из кремниевой плёнки толщиной $\delta_{\text{кл}} = 0,58 \cdot 10^{-3}$ м и удельным электрическим сопротивлением $\rho_{\text{кл}} = 1,2$ Ом·м [9].

Обкладки единичной ёмкости БК могут быть выполнены из графеновой плёнки толщиной, не превышающей 10 нм [5] в виде кольца с внутренним диаметром $d_{\text{вн}}=0,02$ м и наружным диаметром $D_{\text{нар}}=0,03$ м. Диэлектрический слой ёмкости БК может быть выполнен из сегнетоэлектрической пленки $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BSTO) толщиной $\delta_{\text{БК}}=2\cdot 10^{-7}$ м, с относительной электрической проницаемостью $\varepsilon=50$ и электрической прочностью 100 В/мкм [6]. Диодный слой ёмкостного элемента БК так же выполнен в виде Trench структуры диода Шоттки толщиной $\delta_{\text{ш}}=7000$ нм, удельным сопротивлением $\rho_{\text{ш}}=0,02$ Ом·м [7]. Таким образом, толщина одного ёмкостного элемента составит 7220 нм, а n' – число ёмкостных элементов на погонном метре ССК достигнет 138504 шт.

Для снижения сопротивления $R_{\text{д5}}$ и $R_{\text{к}}$ структуры диодного слоя 5 и СК заменим на набор полевых транзисторов (ПТ) на основе графена, выполненных на торцах обкладок единичных ёмкостей. На сегодняшний день графеновые транзисторы с шириной канала $l_{\text{кан.ПТ}}=140$ нм обладают значением тока, отнесенным к единице ширины канала $j_{\text{ПТ}}=3,3$ А/м, активной междуэлектродной проводимостью на уровне $\sigma=1,3\cdot 10^3$ См/м или условным сопротивлением отнесенным к единице ширины канала $\rho_{\text{граф}}=7,69\cdot 10^{-4}$ Ом·м, а минимальная частота переключений составляет порядка 100 ГГц [10]. Ввиду снижения количества ёмкостных элементов БК пространство между ними заполняется медным проводником, графеновые обкладки единичных ёмкостей также армируются медным напылением толщиной $\delta_{\text{об Cu}}=30$ мкм. Это приводит к появлению дополнительного омического сопротивления $R_{\text{Бз}}$ в цепи заряда и $R_{\text{об ср}}$ в цепи разряда.

Структура ССК с набором ПТ в ОК представлена на рис. 10.

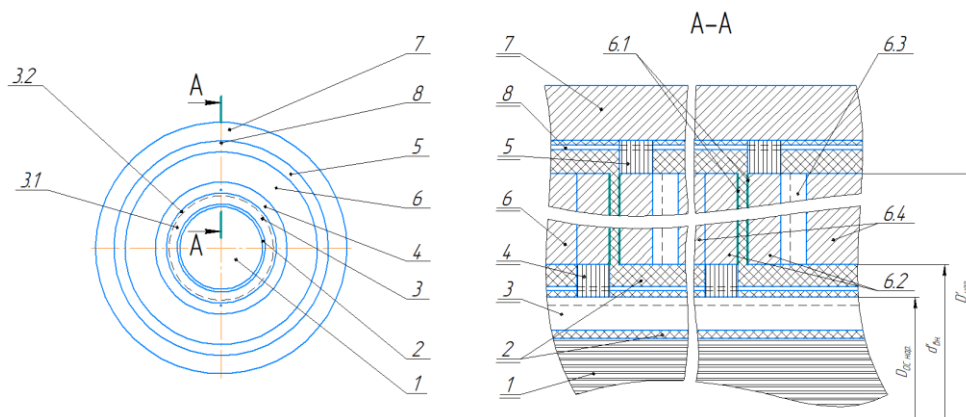


Рис. 10. Структура ССК с набором ПТ в ОК:

- 1 – СЧ (многослойное, коаксиальное, биполярное исполнение);
- 2 – электроизоляционный слой (BSTO);
- 3 – ОС (3.1 – ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$; 3.2 – термоэлектрической плёнки из Bi–Sb);
- 4 – набор ПТ ОС; 5 – набор ПТ БК; 6 – БК (6.1 – графеновые обкладки;
- 6.2 – медное напыление обкладок; 6.3 – диодный слой ёмкостного элемента БК;
- 6.4 – медный проводник между ёмкостными элементами БК);
- 7 – медная лента с защитным покрытием и заземляющими элементами;
- 8 – изолированные шины затворов ПТ и цепи заряда

В данной работе не рассматриваются конкретные нано-схемотехнические решения. На сегодняшний день они могут быть выполнены на основе отработанных технологий, используемых при производстве силовых полупроводниковых приборов и СБИС с ПТ, как на базе однослойного графена, так и с применением углеродных нанотрубок. В настоящее время на фабрике TSMC (Тайвань) освоено серийное производство по технологическим нормам 5 нм.

В России существует полный цикл производства чипов по технологическим нормам 90 нм, однако в данном случае такая миниатюризация избыточна. Поэтому для предварительного анализа геометрии ССК принимаем: набор ПТ – многослойная кольцевая структура, толщина одного слоя $\delta_{\text{сл. ПТ}}=600$ нм (300 нм – подложка со структурами ПТ, подложка может быть изготовлена из сильно легированного кремния, покрытого слоем SiO_2 , 300 нм – электроизоляционный слой BSTO, чтобы исключить туннельный перенос заряда), размер ПТ с длиной затвора 140 нм в плоскости подложки $a \times b = 300 \times 300$ нм, шаг транзисторов в плоскости подложки $h_{\text{ПТ}} = 500$ нм (в радиальном и кольцевом направлении).

Число слоёв набора ПТ, подсоединённое к торцевой поверхности одной обкладки:

$$n_{\text{с1}} = \frac{\delta_{\text{ОбCu}}}{\delta_{\text{сл.ПТ}}} = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{600 \cdot 10^{-9}} = 50.$$

Количество транзисторов необходимое разместить на одном слое набора ПТ:

$$n_{\text{ПТ1}} = \frac{n_{\text{ПТ}}}{n' \cdot n_{\text{с1}}} = \frac{10^{12}}{3025 \cdot 50} = 6,612 \cdot 10^6.$$

Количество транзисторов в концентрическом ряду подложки слоя набора ПТ:

$$n_{\text{ПТр1}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{Ос нар.}}}{h_{\text{ПТ}}} = \frac{3,14 \cdot 0,0199}{500 \cdot 10^{-9}} = 124972.$$

Необходимое количество концентрических рядов на подложке одного слоя набора ПТ:

$$n_{\text{р}} = \frac{n_{\text{ПТ1}}}{n_{\text{ПТр1}}} = \frac{6,612 \cdot 10^{12}}{124972} = 53.$$

Радиальная ширина подложки:

$$h_{\text{подл.}} = n_{\text{р}} \cdot h_{\text{ПТ}} = 53 \cdot 500 \cdot 10^{-9} = 2,65 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Очевидно, что наружный диаметр стометрового ССК не превысит 45 – 50 мм.

Выводы. Сформулируем следующие основные выводы:

1. При многослойной структуре ОК и последовательном электрическом соединении ОС величина интегрального эффекта снижения температуры $\Delta T_{\text{п}}$ падает пропорционально росту числа слоёв n , что не позволяет достичь необходимого охлаждающего эффекта.
2. В однослойной структуре ОК при поддержании эффекта сверхпроводимости конструкции силовой части ССК в стационарном режиме нет объёмного тепловыделения, процесс термоэлектрического охлаждения высокоамперный и низковольтный.
3. Электрическая мощность, затрачиваемая в процессе термоэлектрического охлаждения в однослойной структуре ОК, не зависит от электрической мощности, передаваемой ССК, а зависит только от минимальной критической температуры материала сверхпроводящих элементов, присутствующих в конструкции ССК, а также от температуры наружной поверхности ОС и длины кабеля. Это приводит к необходимости выполнить конструкцию силовой части ССК по многослойной биполярной коаксиальной схеме.

4. Использование в силовой части ВТСП с критической температурой сверхпроводящего перехода выше 60 К и ОС из криогенной, термоэлектрической плёнки Bi–Sb и пассивной ветви выполненной из ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, позволяет снизить $I_{\text{ох.пр.}}$ до $6,67 \cdot 10^4$ А, $R_{\text{ф.пр.}}$ до $1,52 \cdot 10^{-11}$ Ом, при передаваемой ССК электрической мощности $N_{\text{эл}} = 360 \cdot 10^3$ Вт, повысив К.П.Д электропередачи, стометрового кабеля выше 99%.
5. Ввиду того, что величина охлаждающего тока, протекающего через ОС значительна, $I_{\text{ох.пр.}}$ генерируется в виде импульсов пилообразной формы, формируемых ёмкостным трансформатором встроенным в конструкцию ССК с внешним источником питания ОК и внешним источником управляющих импульсов СК, вынесенными за пределы конструкции ССК.
6. При выполнении диодного слоя 5 в виде Trench структуры диода Шоттки, а СК в виде тиристорной структуры из кремниевой плёнки, $U_{\text{р.м.}}$ превышает 20 В, необходимые исходя из условия электрической прочности диэлектрического слоя единичной ёмкости БК.
7. Для исключения пробоя диэлектрического слоя единичной ёмкости необходимо снизить $R_{\text{д5}}$ и $R_{\text{к}}$ до $5,493 \cdot 10^{-9}$ Ом, сохранив $I_{\text{ох.пр.}} = 6,67 \cdot 10^4$ А (упоминания о производстве полупроводниковых приборов с такими характеристиками в литературе нет), поэтому структуры диодного слоя 5 и СК предлагается заменить на набор ПТ на основе графена, выполненных на торцах обкладок единичных ёмкостей, что позволит получить $U_{\text{р.м.}} = 1,76 \cdot 10^{-2}$ В; $E_{\text{гпи}} = 37,45$ В; $\eta' = 99,999$.

Таким образом, синтез технологий производства сверхпроводящей электротехнической продукции, силовых полупроводниковых приборов и СБИС при сегодняшнем уровне развития техники позволяет создать ССК с К.П.Д электропередачи более 99%, а результаты аналитического исследования, представленные в статье, являются необходимым основанием для проектирования, конструирования и разработки технологии производства ССК.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Варакута, В. В. Снижение загрязнения атмосферы угледобывающих регионов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.19 / Варакута Виктор Владимирович; ДОННТУ. – Донецк, 2021. – 173 с. Требования к изготовлению рудничного взрывозащищённого электрооборудования на напряжение 3(3,3) кВ // МакНИИ, ЗАО «Донецксталь». – Макеевка-Донбасс, 2007.
2. Передача электроэнергии на большие расстояния: учебное пособие / С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей, А. Л. Мызин; изд. 3-е, исправл. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 85 с.
3. Захаров, А. В. Сравнительный анализ низковольтных и высоковольтных сверхпроводящих кабелей / А. В. Захаров // Научные и технические проблемы электроэнергетики. – 2024. – Т. 15. – С. 101-109.
4. Сидоренко, Н. А. Криогенный термоэлектрический модуль для рабочего интервала температур ниже 90 К / Н. А. Сидоренко, З. М. Дашевский // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53. – Вып. 6. – С. 761-764.
5. Шурыгина, В. В. «Чудо-материал» – графен новый конкурент на рынке РЧ-электроники / В. В. Шурыгина // ЭЛЕКТРОНИКА наука / технология / бизнес. – 2014. – №4 (00135). – С. 141 – 148.
6. Зубко, С. П. Эффективная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки в составе плоскопараллельных и планарных конденсаторов / С. П. Зубко, А. Г. Гагарин, Н. Ю. Медведева // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2016. – Вып.1. – С. 51-54.
7. Конструктивно-технологическое усовершенствование Trench-диодов Шоттки / П. Андреев, Н. Голубев, В. Котов [и др.]// Силовая Электроника. – 2012. – № 2. – С. 14-16.
8. Новые возможности изготовления мощных быстродействующих тиристоров / Д. Титушкин, А. Сурма, А. Черников, С. Матюхин. // Электронные компоненты. – 2015. – №9. – С. 66-68.
9. Смирнов, В. И. Нанoeлектроника, нанофотоника и микросистемная техника: учебное пособие / В. И. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – 280 с.

Поступила в редакцию 15.11.2024 г., рекомендована к печати 09.01.2025 г.

SELF-COOLING SUPERCONDUCTING CABLE

Biriukov A.B., Gridin S.V., Varakuta V.V.

The article discusses the technical aspects of creating a low-voltage self-cooling superconducting cable. The basic technical characteristics necessary for the design and construction of the cable are proposed, as well as simplified calculations of the parameters necessary to determine its effectiveness. The technologies that can be used in the production of this cable have been selected.

Keywords: superconducting element, power unit, cooling capacity, cooling microlayer, cooling current, electric power, thermal efficiency coefficient, capacitance, diode layer, field effect transistor.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гридин Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: g.gridin_@mail.ru

Gridin Sergei Vasilevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Industrial Heat and Power Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Варакута Виктор Владимирович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела электрических машин ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: varakutaviktor@mail.ru

Varakuta Viktor Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Integrated Research Department of Electric Machines of Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof and Mining Electrical Equipment,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ БЛОКАХ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЕШЛАМОВ

© 2025 Сурикова А.Н., Соловьева Е.В., Старостин А.В.

Приведены описания блоков разделения нефтешламов (БРНШ), представлена принципиальная тепловая схема многоступенчатой выпарной установки по удалению влаги из нефтешлама, рассмотрена методика определения режимных и конструктивных параметров многоступенчатой выпарной установок.

Ключевые слова: БРНШ, нефтешлам, нефтепродукты, очистка, утилизация, шлам, нефть, эмульсия, обезвоживание.

Введение. В настоящее время на предприятиях нефтяной промышленности накопилось значительное количество отходов нефтешламов – технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти. На многих предприятиях нефтешламы, хотя и являются отходами III класса опасности при отсутствии налаженной схемы переработки, годами накапливаются в шламонакопителях, оказывая негативное действие на окружающую среду [1].

Один из способов утилизации нефтешлама, это использование блоков разделения нефтешламов (БРНШ), в них производится обезвоживание водонефтяных эмульсий «обратного» типа, в которых капельки воды содержатся внутри нефти, с влажностью, обычно, не выше 20...35 %. Испарение влаги из нефтешламов в БРНШ производится под вакуумом в тонких пленках, при этом сохраняются ценные компоненты нефтешламов, имеется возможность обезвоживания высокоустойчивых эмульсий с близкими значениями плотностей фаз [2].

Основным недостатком существующих установок БРНШ является их низкая энергоэффективность, обусловленная наличием всего лишь одной выпарной ступени, в которой теплота греющей воды, получаемой в водогрейном котле, расходуется на выпаривание влаги из нефтешлама, а теплота образующегося пара никак не используется и теряется в окружающей среде [3-4].

Цель данной научно исследовательской работы: повышение эффективности многоступенчатой выпарной установки методом оптимизации количества технологических ступеней.

Так, для снижения влагосодержания на 1 % в 1 тонне обводненного нефтешлама требуется выпарить 10 кг влаги, что при теплоте испарения $r = 2320$ кДж/кг потребует расхода теплоты 23,2 МДж. Приняв коэффициент использования теплоты топлива, сжигаемого в водогрейном котле, равным $\eta_k = 0,9$, получим, что удельный расход условного топлива с теплотой сгорания 29,3 МДж/кг на удаление 1 % влаги из 1 тонны нефтешлама составит $23,2 / (0,9 \cdot 29,3) = 0,88$ кг.у.т. Если учесть, что на разогрев нефтешлама из холодного состояния до температуры выпаривания дополнительно расходуется примерно 15÷20 % всего топлива, то удельный расход условного топлива на удаление 1 % влаги из 1 тонны нефтешлама составит примерно $b_0 \approx 1$ кг.у.т. При исходном и остаточном влагосодержании в нефтешламе равном соответственно 30 % и 1 %, расход условного топлива составит 29 кг.у.т. на 1 тонну обводненного нефтешлама, или 41,4 кг.у.т. на 1 тонну обезвоженного нефтепродукта.

Если теплоту пара, получаемого в основной выпарной ступени, использовать для обогрева второй ступени, то можно увеличить производительность всей установки примерно в 2 раза, при этом удельный расход топлива b на выпаривание влаги из 1 тонны нефтешлама, снизится также в 2 раза. Если теплоту пара, получаемого во второй ступени, использовать для обогрева третьей ступени, то производительность установки увеличится примерно в 3 раза, и во столько же раз снизится удельный расход топлива, сжигаемого в котле. Если установить n выпарных ступеней, каждая из которых обогревается паром, выходящим из предыдущей ступени, то можно увеличить производительность установки примерно в n раз, и снизить удельный расход топлива в n раз (если не учитывать потерь теплоты в каждой ступени). Этот известный принцип давно используется в многоступенчатых выпарных установках (МВУ) [5]. Однако, одновременно с увеличением производительности и снижением удельного расхода топлива, увеличение количества выпарных ступеней приводит к увеличению стоимости всей установки, так как при этом возрастает не только число, но и размеры поверхностей нагрева каждой ступени. Также пропорционально числу выпарных ступеней возрастают затраты электроэнергии на перекачку нефтешлама. Очевидно, существует оптимальное число выпарных степеней, при котором материальные и денежные затраты на обезвоживание одной тонны нефтешлама будут минимальными.

Основная часть. На рис. 1 представлена предлагаемая принципиальная тепловая схема многоступенчатой выпарной установки по удалению влаги из нефтешлама, которая в отличие от существующих одноступенчатых установок, и двухступенчатой установки, содержит n выпарных ступеней.

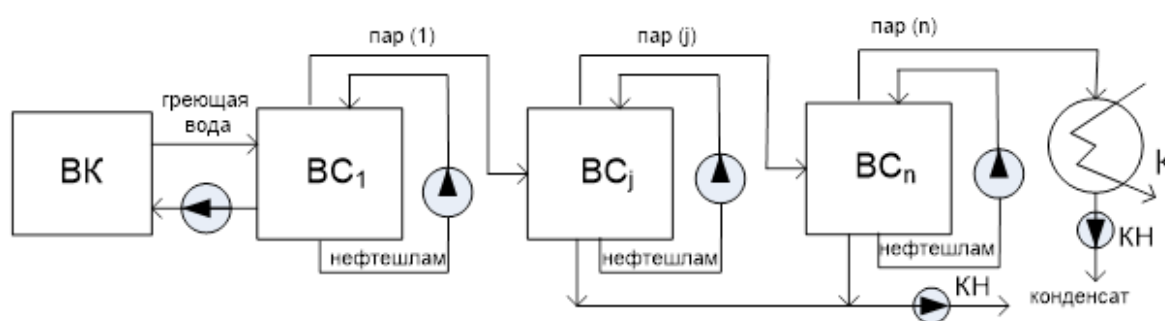


Рис. 1. Многоступенчатая установка по выпариванию влаги из нефтешлама

Технологический принцип работы многоступенчатой схемы описан ниже. Первая ступень BC_1 обогревается греющей водой из водогрейного котла ВК со средней температурой t_0 , значение которой определяется условиями техники безопасности и находится в диапазоне $90 \div 95$ °С. Для увеличения массообменной поверхности нефтешлама в каждой выпарной ступени производится его непрерывная циркуляция: нефтешлам забирается насосом из нижней части ступени, где находятся греющие трубы, и подается на испарительные полки, расположенные в верхней части ступени, где происходит частичное испарение влаги из нефтешлама, после чего он сливается самотеком в нижнюю часть выпарной ступени. Пар, выходящий из первой ступени BC_1 с температурой t_1 (определяемой давлением p_1 внутри этой ступени), направляется для обогрева 2-й ступени, где конденсируется внутри греющих труб при той же температуре t_1 (если пренебречь гидравлической депрессией, т.е. снижением температуры конденсации пара из-за потери давления пара на преодоление гидравлических сопротивлений в трубопроводах между корпусами).

Пар, выходящий из второй ступени с температурой t_2 и давлением p_2 , направляется для обогрева 3-й ступени, где конденсируется внутри греющих труб при температуре t_2 , и т.д. Из последней ступени BC_n с номером n выходит пар с температурой t_n и давлением p_n , с которыми пар поступает в конденсатор К, охлаждаемый водой. Конденсат пара из всех выпарных ступеней, кроме первой (основной), а также из конденсатора, откачивается конденсатными насосами КН. Несконденсированные газы, выходящие из выпарных ступеней, а также из конденсатора, удаляются эжекторами (на схеме рис. 1. они не показаны). Можно считать, что рациональное значение температуры конденсации пара $t_k = t_n$, выходящей из последней ступени, находится в диапазоне $50 \div 55$ °С, что соответствует давлению $p_k = p_n = 12,3 \div 15,7$ кПа. При более низких температурах резко возрастает вязкость большинства нефтепродуктов, например, у масла МК при уменьшении температуры с 50 до 40 °С динамический коэффициент вязкости μ увеличивается с 1638 до 3031 Па·с, т.е почти в два раза. При этом затраты на перекачку нефтешлама также резко вырастут.

Теплоту пара, выходящего из последней ступени, возможно использовать в утилизационном теплообменнике УП для предварительного подогрева нефтешлама, который в следующий цикл работы будет загружаться в выпарные ступени установки. При большом числе выпарных ступеней n масса загружаемого в утилизационный теплообменник нефтешлама достаточно большая, и примерно равна $M \approx n \cdot M_0$, где M_0 – масса нефтешлама, загружаемого в одну ступень. В утилизационном теплообменнике УП с надлежащей тепловой изоляцией влажный нефтешлам можно разогреть примерно до температуры $40 \dots 45$ °С, чтобы минимальный температурный напор между греющим паром и нефтешламом был не меньше 10 °С (температура греющего пара равна $t_k = 50 \dots 55$ °С).

Определим минимальное число ступеней, при котором теплота отработавшего пара из последней ступени может быть полностью использована для подогрева влажного холодного нефтешлама от температуры $t_{ш0} = 15 \dots 20$ °С до $t_{ш} = 40 \dots 45$ °С, т.е примерно на 25 К. При исходной влажности нефтешлама $\varphi_0 = 0,3$, и конечной влажности $\varphi_k = 0,01$, из нефтешлама массой M_0 , загруженного в последнюю ступень, выйдет такое количество пара: $M_{п} = M_0(\varphi_0 - \varphi_k)$. При конденсации данного пара в утилизационном подогревателе будет получено такое количество теплоты: $Q_{п} = M_{п} \cdot r$. При хорошей тепловой изоляции эта теплота почти полностью пойдет на нагрев влажного нефтешлама массой $M = n \cdot M_0$:

$$Q_{п} \approx Q_{ш} = M \cdot c_{ш} \cdot (t_{ш} - t_{ш0}) = n \cdot M_0 \cdot c_{ш} \cdot (t_{ш} - t_{ш0}),$$

где $c_{ш}$ – средняя теплоемкость влажного нефтешлама.

Из последнего выражения, подставив в него $Q_{п} = M_0(\varphi_0 - \varphi_k) \cdot r$, выразим n :

$$n \approx \frac{(\varphi_0 - \varphi_k) \cdot r}{c_{ш} (t_{ш0} - t_x)}.$$

При $t_{ш0} = 20$ °С и $t_{ш} = 45$ °С средняя теплоемкость нефтешлама с влажностью 30 %, равна: $c_{ш} = 2,462$ кДж/(кг·К). Приняв $r = 2320$ кДж/кг, по последней формуле найдем: $n = 10,9$, или, с учетом неизбежных потерь теплоты, можно округлить до значения $n \approx 10$. Таким образом, при числе ступеней $n \geq 10$ теплоту отработавшего пара можно использовать полностью в утилизационном теплообменнике для подогрева холодного нефтешлама.

При меньшем числе ступеней утилизационный теплообменник позволяет использовать лишь некоторую часть теплоты отработавшего пара (остальная часть неизбежно теряется), но нефтешлам можно подогреть до более высокой температуры (45...50 °С). В любом случае, наличие утилизационного теплообменника приводит к дополнительному усложнению установки БРНШ, а дополнительное снижение удельного расхода топлива за счет его установки не превышает 10 %.

При оптимизации числа выпарных ступеней постоянной величиной примем: тепловой поток Q (кВт), подводимый с греющей водой к первой ступени; среднюю температуру греющей воды t_0 (°С); температуру t_k и давление p_k пара, выходящего из последней выпарной ступени. Для оптимизации расчета считаем, что теплота испарения r не зависит от давления пара, т.е. является так же постоянной. Потерями теплоты в каждой ступени пренебрегаем, т.к. эти потери можно свести к минимуму за счет применения надлежащей тепловой изоляции корпусов выпарных ступеней и паропроводов.

Пусть $t_1, t_2, \dots, t_n$ – температуры пара на выходе из ступеней 1, 2, ..., n . Располагаемый температурный напор между греющим теплоносителем и нагреваемым нефтешламом в j -ой ступени определяется выражением: $\Delta t_j = t_{j-1} - t_j$; при этом для первой ступени $\Delta t_1 = t_0 - t_1$, для второй – $\Delta t_2 = t_1 - t_2$, для n -ой ступени $\Delta t_n = t_{n-1} - t_n$. Сумма располагаемых температурных напоров во всех ступенях равняется $\Delta t_{\max} = t_0 - t_n = t_0 - t_k$; тогда:

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n = \Delta t_{\max}, \quad (1)$$

где $\Delta t_{\max}$ – заданная по условию величина.

При оптимизации многоступенчатых выпарных установок для всех ступеней часто принимают одинаковый располагаемый температурный напор [5], т.е.: $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n$. С учетом выражения (1) получаем:

$$\Delta t_j = \Delta t_{\max} / n,$$

где $j = 1, 2, \dots, n$.

Поскольку потерями теплоты пренебрегли, то можно записать:

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n, \quad (2)$$

где Q_j – поток теплоты, кВт, расходуемый в j -ой ступени на образование пара с расходом G_j , кг/с, где $j = 1, 2, \dots, n$. Между величинами Q_j и G_j есть точное соотношение:

$$Q_j = r \cdot G_j. \quad (3)$$

Так величину Q_0 считаем постоянной, то из выражений (2) и (3) следует, что

$$G_1 = G_2 = \dots = G_n,$$

и суммарный выход пара из всех ступеней равняется:

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n = n \cdot G_1 = n \cdot Q_0 / r. \quad (4)$$

Из (4) следует, как утверждалось выше, суммарная производительность установки G пропорциональна числу ступеней n . Удельный расход теплоты на единицу выпаренной влаги, равняется:

$$q = Q_0 / G = r / n. \quad (5)$$

Поскольку расход условного топлива в водогрейном котле B , кг/с, связан с величиной Q_0 выражением: $B \cdot Q_n \cdot \eta_k = Q_0$, где $Q_n = 29310$ – теплота сгорания условного топлива, кДж/кг, η_k – к.п.д. котла, то с помощью (5) получим выражение для удельного расхода топлива, кг/кг:

$$b = B / G = (r / Q_n) / (\eta \cdot n) = b_0 / n, \quad (6)$$

где $b_0 = (r/Q_n)/\eta$ – удельный расход топлива в одноступенчатой установке.

Если принять к.п.д. котла $\eta = 0,9$, а теплоту испарения $r = 2320$ кДж/кг, то из (6) получим: $b \cong 0,088/n$, кг/кг. При $n = 1$ (одноступенчатая установка) на удаление 1 кг влаги расходуется 0,088 кг условного топлива. При $n = 2$ удельный расход топлива снижается в 2 раза и равняется 0,044 кг/кг. Из (6) следует, что удельный расход топлива уменьшается обратно пропорционально числу выпарных ступеней n .

Рассмотрим, как изменяются необходимые поверхности нагрева ступеней при увеличении их числа. Тепловой поток, Вт, подводимый к j -ой ступени, можно выразить уравнением теплопередачи:

$$O_j = k_j \cdot \Delta \bar{t}_j \cdot F_j = k_j \cdot \zeta_j \cdot \Delta t_j \cdot F_j, \quad (7)$$

где k_j – коэффициент теплопередачи от греющего теплоносителя к нефтешламу в j -ой ступени, Вт/(м²·К); $\Delta \bar{t}_j$ и Δt_j – средний и располагаемый температурный напоры в j -ой ступени, °С; ζ_j – коэффициент, связывающий величины $\Delta \bar{t}_j$ и Δt_j ($\Delta \bar{t}_j = \zeta_j \cdot \Delta t_j$); F_j – площадь поверхности нагревателя в j -ой ступени, м².

Коэффициенты $\zeta_j \leq 1$, зависят от гидравлических потерь при движении греющего пара, из-за которых понижается температура конденсации греющего пара, и от расхода нефтешлама, перекачиваемого циркуляционным насосом, от которого зависит средняя температура нагреваемого нефтешлама. Гидравлические потери зависят от диаметра паропроводов между ступенями, и их можно сделать пренебрежимо малыми. Коэффициент ζ тем ближе к 1, чем больше величина $\omega = W_{ш}/(k \cdot F)$, где $W_{ш}$ – водяной эквивалент перекачиваемого нефтешлама, что видно из рис. 1. При значении $\omega = 5$ коэффициент $\zeta = 0,909$; при $\omega = 2$ величина $\zeta = 0,8$; при $\omega = 1$ величина $\zeta = 0,67$. Рациональным значением параметра ω примем значение $\omega = 5$, что примерно соответствует условиям работы БРНШ-3 в установившемся режиме выпаривания. Чтобы параметр ω не изменялся при увеличении величины $k \cdot F$, необходимо, чтобы водяной эквивалент $W_{ш}$ для каждой ступени при увеличении числа n выпарных ступеней увеличивался пропорционально величине $k \cdot F$, тогда коэффициент ζ будет оставаться постоянным. Ниже показано, что величина $k \cdot F$ для каждой выпарной ступени с увеличением числа ступеней должна расти пропорционально n . Тогда величина $W_{ш}$ и затраты электроэнергии на перекачку нефтешлама для одной ступени вырастут в n раз, а для всей многоступенчатой установки – в n^2 раз по сравнению с одноступенчатой установкой. Далее считаем величины ω и ζ одинаковыми и постоянными для всех ступеней при любом их числе n .

Из-за высокого коэффициента теплоотдачи α_1 при движении греющей воды или конденсации греющего пара внутри греющих труб, и из-за пренебрежимо низкого термического сопротивления стенки греющих труб, коэффициент теплопередачи k в нагревателях выпарных ступеней равен практически коэффициенту теплоотдачи α_2 к нагреваемому нефтешламу на наружной поверхности греющих горизонтальных труб.

При теплоотдаче за счет свободной конвекции, коэффициент α примерно пропорционален $\Delta t^{0,25}$, где Δt – средний температурный напор в данной ступени. Если пренебречь зависимостью теплофизических параметров нефтешлама от температуры, то при постоянном диаметре греющих труб можно получить следующую формулу:

$$k_j = k_{\max} \cdot \left(\frac{\Delta t_j}{\Delta t_{\max}} \right)^{0,25},$$

где $k_{\max}$ – коэффициент теплопередачи в одноступенчатом выпарном аппарате, в котором используется весь температурный напор $\Delta t_{\max}$. Поскольку $\Delta t_j = \Delta t_{\max}/n$, то последнюю формулу можно записать так:

$$k_j \cong k_{\max} / n^{0,25}. \quad (8)$$

Из формулы (7) выразим величину поверхности нагрева в j -ой ступени:

$$F_j = O_j / (k_j \cdot \xi_j \cdot \Delta t_j) = Q_0 / (k_{\max} \cdot \xi_j \cdot \Delta t_{\max}) \cdot n^{1,25} = F_0 \cdot n^{1,25}, \quad (9)$$

где $F_j = O_j / (k_j \cdot \xi_j \cdot \Delta t_j)$ – поверхность нагревателя в одноступенчатой установке.

Из (8) и (9) следует, что произведение:

$$k_j \cdot F_j = k_{\max} \cdot F_0 \cdot n,$$

т.е. по сравнению с одной выпарной ступенью, у которой $k \cdot F = k_{\max} \cdot F_0$, при n ступенях величина $k \cdot F$ больше в n раз, поэтому величина W_m также должна возрасти в n раз, иначе коэффициент ζ резко снизится, и поверхность нагрева будет работать неэффективно. Суммарная площадь поверхностей нагревателей всех ступеней с учетом (9) составит:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = n \cdot F_j = F_0 \cdot n^{2,25}.$$

Таким образом, при указанных условиях, доказано, что суммарная площадь F поверхностей нагрева всех выпарных ступеней многоступенчатой установки пропорциональна числу ступеней в степени 2,25: $F \sim n^{2,25}$.

Выводы. Таким образом, можно сделать вывод: описанная методика определения режимных и конструктивных параметров многоступенчатой выпарной установки при условии неизменности теплового потока к нефтешлама в каждой ступени дает возможность утверждать, что производительность установки БРНШ растет прямо пропорционально числу ступеней n , а удельный расход топлива на выпаривание 1 тонны влаги – обратно пропорционально n . При этом температурный напор в каждой ступени определяется выражением $\Delta t = \Delta t_{\max}/n$, где $\Delta t_{\max} = 40 \dots 45$ °С, где n – число ступеней. Показано, что площадь поверхности нагрева F одной выпарной ступени пропорциональна $n^{1,25}$, а всех ступеней – $n^{2,25}$. Необходимое число циркуляционных насосов для одной ступени пропорционально n , а всех ступеней – n^2 .

Данные настоящей работы возможно использовать, как при определении оптимального количества ступеней многоступенчатой выпарной установки, так и при оценке эффективности БРНШ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скрябин, А. В. Современные технологии переработки нефтешламов / А. В. Скрябин, Н. А. Толмачева, Ю. М. Вдовина // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 20–21 апреля 2022 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 294-299. – EDN TSHTFM.

2. Файзуллин, Т. Р. Образование и переработка нефтешламов / Т. Р. Файзуллин // Современные технологии: достижения и инновации: Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции, Стерлитамак, 27 декабря 2022 года / Материалы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за достоверность материалов, изложенных в сборнике. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 89-91. – EDN NZHBDS.
3. Низамутдинова, С. В. Перспективные технологии и оборудование переработки и утилизации нефтешлама / С. В. Низамутдинова, Л. Н. Короткова // Обращение с отходами: современное состояние и перспективы : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Уфа, 13 декабря 2018 года / Под редакцией И.О. Туктаровой. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2018. – С. 218-221. – EDN YXCTKX.
4. Анализ методов переработки нефтешламов. Проблемы и решения / С. В. Афанасьев, М. В. Кравцова, М. А. Паис, Н. С. Носарев // Инновации и "зеленые" технологии : Вторая Всероссийская научно-практическая конференция, Тольятти, 19 апреля 2019 года. – Тольятти: ИП Зуев Сергей Анатольевич, 2019. – С. 22-27. – EDN ZGEORU.
5. Сурикова, А. Н. Повышение эффективности работы блока разделения нефтешлама / А. Н. Сурикова, Ю. С. Поповская // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы XI Международной научно-технической конференции, Вологда, 22–23 марта 2016 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2016. – С. 157-160. – EDN VUHNML.

Поступила в редакцию 29.01.2025 г., рекомендована к печати 11.02.2025 г.

DETERMINATION OF OPERATIONAL AND DESIGN PARAMETERS OF MULTI-STAGE OIL SLUDGE SEPARATION UNITS

Surikova A.N., Soloveva E.V., Starostin A.V.

The descriptions of oil sludge separation units (BRCS) are given, the schematic thermal diagram of a multi-stage evaporation plant for removing moisture from oil sludge is presented, and the methodology for determining the operating and design parameters of a multi-stage evaporation plant is reviewed.

Keywords: BRNSH, oil sludge, petroleum products, purification, utilization, sludge, oil, emulsion, dewatering.

Сурикова Алиса Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры
теплогазоводоснабжения ФГБОУ ВО
«Вологодский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Вологда.
E-mail: alisa-surikova@bk.ru

Surikova Alisa Nikolaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor at Department of Heat and Gas Water
Supply of Vologda State University,
Russian Federation, Vologda.

Соловьева Екатерина Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой архитектуры и градостроительства
ФГБОУ ВО «Вологодский государственный
университет»,
Российская Федерация, г. Вологда.
E-mail: evsvologda@mail.ru

Soloveva Ekaterina Viacheslavovna

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Head of the Department of Architecture
and Urban Planning of Vologda State University,
Russian Federation, Vologda.

Старостин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры
технологии машиностроения ФГБОУ ВО
«Вологодский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Вологда.
E-mail: starostinav@vogu35.ru

Starostin Alekdandr Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor at Department of Mechanical Engineering
Technology of Vologda State University,
Russian Federation, Vologda.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КОМПАКТНЫХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕД

© 2025 *Малеваный М.В., Коновалов Д.А., Черниченко В.В., Солженикин П.А., Крылова Е.В.*

Работа посвящена обзору современных исследований по тематике интенсификации теплогидравлических характеристик в компактных теплообменных устройствах. В качестве перспективного направления рассматривается повышение эффективности теплообменников за счет использования развитых поверхностей и высокотеплопроводных пористых материалов. Отдельное внимание уделено перспективному направлению интенсификации – использованию неоднородных и анизотропных пористых сред.

Ключевые слова: пористая среда, развитая поверхность теплообмена, высокопористые материалы, интенсификация, анизотропность.

Введение. В настоящее время вопросу рационального и экономичного энергоресурсопотребления уделяется значительное внимание. Одним из направлений повышения эффективности работы современных энергетических систем является интенсификация теплообмена в разного рода теплообменных устройствах, являющихся одной из важнейших составляющих промышленности и энергетики. Кожухотрубные, пластинчатые, спиральные теплообменные аппараты, конденсаторы, испарители, охладители и др. устройства передачи тепла получили широкое распространение во всех отраслях. Развитие теплообменных процессов и устройств обуславливает необходимость интенсификации происходящих в них теплогидравлических процессов. Наиболее часто распространены теплообменные аппараты, в которых осуществляется теплообмен между жидкостями через разделяющую их стенку, а также устройства, в которых нагреваемая поверхность охлаждается омывающим её потоком жидкости или газа. Основной задачей повышения эффективности работы подобных теплообменных аппаратов является улучшение теплообменных показателей без значительного увеличения гидравлического сопротивления и массогабаритных характеристик. Известны такие способы повышения эффективности теплообмена, как увеличение площади поверхности контакта стенки и жидкости [1], однако зачастую подобные способы дают несоразмерное повышение затрат на производство, повышение гидравлического сопротивления, а также значительное увеличение габаритов и массы теплообменного устройства. Также известны решения, связанные с изменением геометрии труб [2] или использованием различного рода турбулизаторов потока [3-6]. Перспективным направлением интенсификации является использование пористых теплообменных элементов [7-10], обладающих высокими теплообменными характеристиками и незначительным гидравлическим сопротивлением, сопоставимым с гладкими каналами, а также позволяющих уменьшить габариты теплообменника. В компактных теплообменниках, использующихся, к примеру, в системах тепловой защиты радиоэлектронных компонентов, аэрокосмической технике, в системах охлаждения процессоров и т.д. существуют достаточно эффективные решения для интенсификации теплогидравлических процессов, в том числе с использованием пористых материалов. Ниже приводятся основные результаты работ, посвященных исследованиям повышения эффективности теплогидравлических характеристик компактных теплообменных элементов.

Интенсификация теплообмена на микромасштабных компактных поверхностях. В исследованиях [11, 12] рассматривалась интенсификация теплообмена и гидравлические характеристики в каналах сэндвич-панелей. В работе [11] численно изучалась сопряженная вынужденная конвективная теплопередача в сэндвич-панели с ферменной сердцевинной Кагоме (рис. 1) как с постоянным тепловым потоком, так и с граничным условием постоянной температуры для различных значений числа Рейнольдса (Re), длины стойки и диаметра стойки. Результаты работы показывают, что в поле течения развиваются сложные структуры течения из-за наличия элементарных ячеек. В работе также отмечено, что перепад давления вдоль ядра Кагоме значительно увеличивается с уменьшением длины и увеличением диаметра стойки, а также что среднее число Нуссельта (Nu) значительно увеличивается при уменьшении длины стойки и незначительно увеличивается при увеличении диаметра стойки.

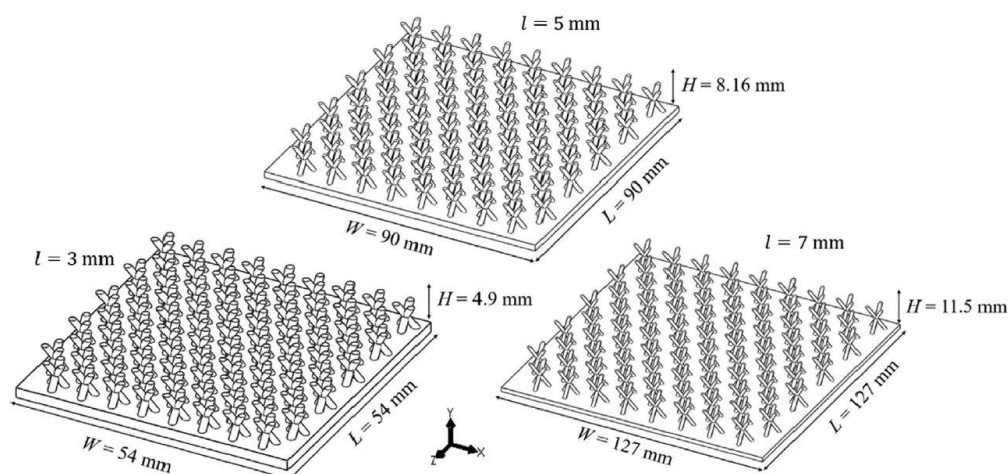


Рис. 1. Геометрические параметры сэндвич-панелей с ядром фермы Кагоме [11]

В работе [12] сравниваются терможидкостные характеристики сэндвич-панелей с Х-решеткой и пирамидальной решеткой при заданной пористости и поверхностной плотности (рис. 2). Численная модель в работе сначала проверяется на основе имеющихся экспериментальных данных. Численные результаты показывают, что при заданном числе Re в диапазоне 3100–5700 сэндвич-панели с Х-решеткой обеспечивают на 47–60% более высокое среднее общее число Nu . Особая топология Х-решетки вызывает встречно вращающиеся спиральные первичные потоки и более сложные вторичные потоки, в том числе тот, который позже становится продольным вихрем. Течение в сэндвич-панели пирамидальной решетки состоит из параллельного первичного потока и встречно вращающейся вихревой пары, закрепившейся в зоне за связками пирамидальной решетки. По сравнению с сэндвич-панелями с пирамидальной решеткой, теплопередача торцевой стенки сэндвич-панели с Х-решеткой увеличивается на 75–97%, а теплопередача поверхности связок увеличивается на 85–97% при заданном числе Re . Также обнаружено, что коэффициент трения сэндвич-панели с Х-решеткой примерно в 2 раза выше для спирального первичного потока и более сложных вторичных потоков, индуцированных шахматными связками.

В работах С.А. Исаева, А.И. Леонтьева и др. [13–18] широко рассмотрены варианты интенсификации теплообмена с помощью овальных лунок различных модификаций (рис. 3), подробно описано влияние всевозможных параметров (геометрия лунок, форма, расположение, параметры течения омывающей жидкости и др.) на теплогидравлические показатели эффективности.

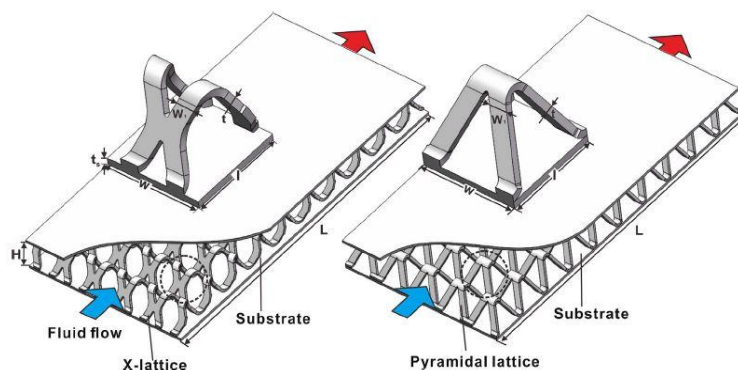


Рис. 2. Сэндвич-панели с X-решеткой и пирамидальной решеткой [12]

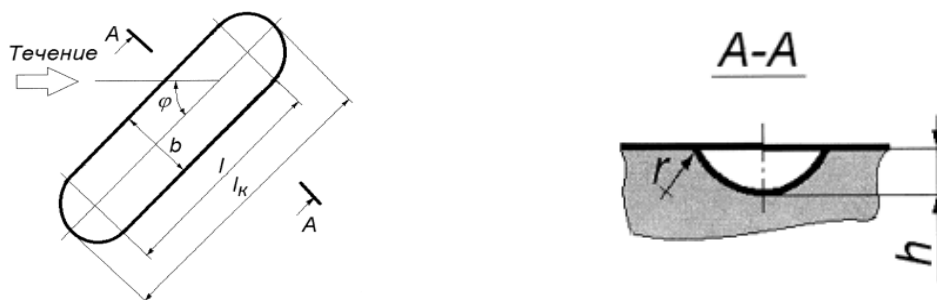


Рис. 3. Вид лунки с учитываемыми геометрическими параметрами [16]

Охлаждению термонапряженных компактных элементов также уделяется достаточно много внимания. Так, в работах [19, 20] описываются исследования высокоэффективных компактных теплообменных поверхностей, снабженных нитевидными кристаллами кремния (рис. 4), способных обеспечивать теплоотвод порядка 250 Вт/см^2 . По результатам исследований получены значения чисел Nu и перепадов давлений для различных режимов течений охлаждающей жидкости.

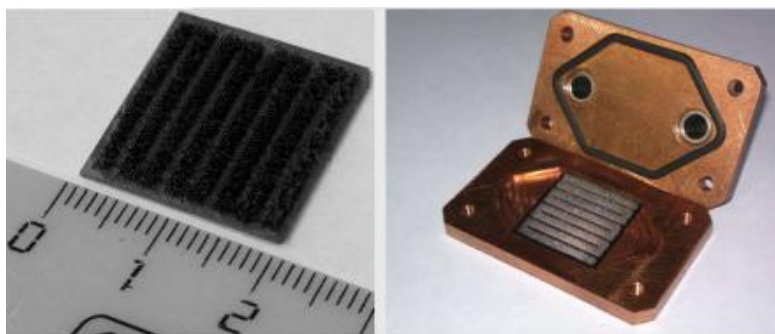


Рис. 4. Фото матрицы из нитевидных кристаллов кремния (слева), фото теплообменника с матрицей из нитевидных кристаллов кремния (справа) [19]

В работе [21] проведено комплексное экспериментальное исследование водохолодильной пластины с различной конфигурацией потока для электронного охлаждения. Для изучения гидротермических характеристик водяной охлаждающей пластины для охлаждения электронных серверов были созданы пластины со змеевидными, параллельными и волнистыми каналами (рис. 5). Результаты показали, что охлаждающая пластина с змеевидными каналами имеет лучшие тепловые характеристики, чем пластины с параллельными и волнистыми каналами.

Охлаждающая пластина со змеевидными каналами обеспечивает меньшее термическое сопротивление на (6,02–10,5 %), (2,4–8,7 %) и большее среднее число Nu на (7,9–13,9 %), (6,3–13,7 %) по сравнению с параллельными и волнистыми каналами охлаждающих пластин соответственно. Кроме того, результаты показали, что охлаждающая пластина с змеевидными каналами имеет более высокий перепад давления и мощность перекачки по сравнению с пластинами с параллельными и волнистыми каналами. Аналогичным образом, результаты показали, что волнистый канал имеет лучшие тепловые характеристики, чем параллельные каналы, из-за большего пути потока и возникновения вращательного потока. Критерий оценки производительности показал, что холодная пластина с волнистыми каналами имеет более высокий критерий оценки производительности, чем змеевидные каналы.



Рис. 5. Модели исследуемых образцов [21]

В работах [22, 23] проводится численный анализ гидравлических и тепловых характеристик нового спирального блока для охлаждения процессоров. В данных работах сравнивались данные по трем каналам: спиральный, змеевидный, плоский (рис. 6). Для повышения эффективности охлаждения в качестве охлаждающей жидкости использовалась наножидкость, имеющая графеновые наночастицы. В случае постоянной мощности накачки спиральный блок демонстрирует лучшую эффективность охлаждения по сравнению с другими типами. Максимальное значение показателя качества для спирального жидкостного блока в 4 раза выше, чем для змеевикового блока.

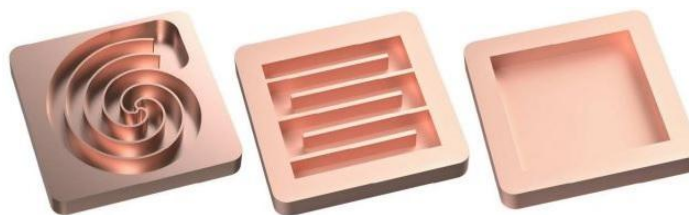


Рис. 6. Три рассматриваемых жидкостных блока: развитый спиральный жидкостный блок (слева), змеевидный жидкостный блок (посередине), основание - плоский жидкостный блок (справа) [23]

В исследовании [24] для повышения эффективности охлаждения фотоэлектрических панелей авторами была предложена новая конфигурация проточного канала с оптимизированной топологией (рис. 7), теплогидравлические показатели которой сравнивались с показателями обычного ребренного блока с прямыми каналами. Результаты показывают, что конфигурация проточных каналов с оптимизированной топологией обеспечивает лучшее охлаждение, чем прямой канал. При различных соотношениях концентраций температура солнечного элемента снижается на 13,85–23,45%. Оптимизированное приложение также имеет меньшие перепады давления на входе и выходе при тех же рабочих условиях, требуя меньше внешней энергии. По сравнению с прямым каналом канал потока с оптимизированной топологией увеличивает полезную выходную мощность фотоэлектрической системы на 3,00–19,37%.

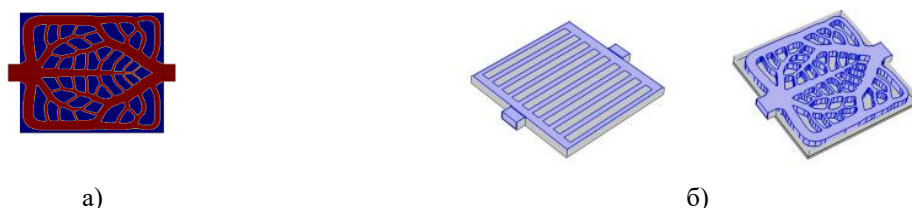


Рис. 7. Конфигурация проточного канала с оптимизированной топологией [24]:

а) конструкция с оптимизированной топологией

б) сравниваемые обычный оребренный радиатор (слева) и оптимизированный радиатор (справа)

В работах [25, 26] исследуются спеченные медные радиаторы в качестве теплообменной поверхности для повышения эффективности работы охлаждающих устройств. В работе [25] численно и экспериментально исследовались радиаторы из меди для жидкостного охлаждения светодиодов. Исследуемые теплообменные поверхности представлены на (рис. 8). В ходе экспериментов сравнивались характеристики теплопередачи и характеристики потока ориентированно-спеченных (Oriented-CCFHS), плоского радиатора, радиатора с оребренным каналом и хаотично-спеченным (Random-CCFHS). Результат показывает, что характеристики теплопередачи ориентированно-спеченных и хаотично-спеченных материалов примерно одинаковы. Сравнивая комплексный индекс оценки производительности потока и теплопередачи, авторы делают вывод, что комплексные характеристики теплопередачи Oriented-CCFHS превосходят показатели Random-CCFHS с той же пористостью, поскольку разница в характеристиках рассеивания тепла между Oriented-CCFHS и Random-CCFHS составляет в пределах 10%, а падение давления у Oriented-CCFHS как минимум на 28,5% ниже, чем у Random-CCFHS. Характеристики потока и характеристики теплопередачи Oriented-CCFHS также были смоделированы с помощью пакета Fluent. Погрешность между результатами экспериментов и результатами моделирования находится в пределах 1–15%.

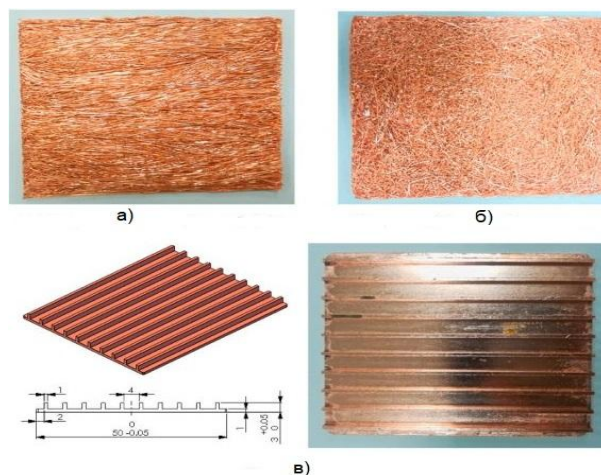


Рис. 8. Различные сердечники радиатора [25]:

а) ориентированное по ходу течения охладителя спеченное медное волокно (OrientedCCFHS)

б) хаотичное спеченное волокно (Random-CCFHS), в) медный сердечник с радиатором

В работе [26] экспериментально исследуется спеченный пористый радиатор для охлаждения мощных компактных микропроцессоров серверного применения (рис. 9). Холодная пластина радиатора представляла собой прямоугольный канал со спеченной пористой медной вставкой пористостью 0,4 и проницаемостью $1,44 \times 10^{-11} \text{ м}^2$.

Принудительная конвекция теплопередачи и перепад давления через пористую структуру изучались с водой в качестве теплоносителя. В ходе исследования удалось отвести тепловые потоки до $2,9 \text{ МВт/м}^2$ в источнике при перепаде давления теплоносителя 34 кПа на пористом образце при сохранении температуры нагревательного перехода ниже допустимого предела $100 \pm 5^\circ \text{C}$ для чипов.

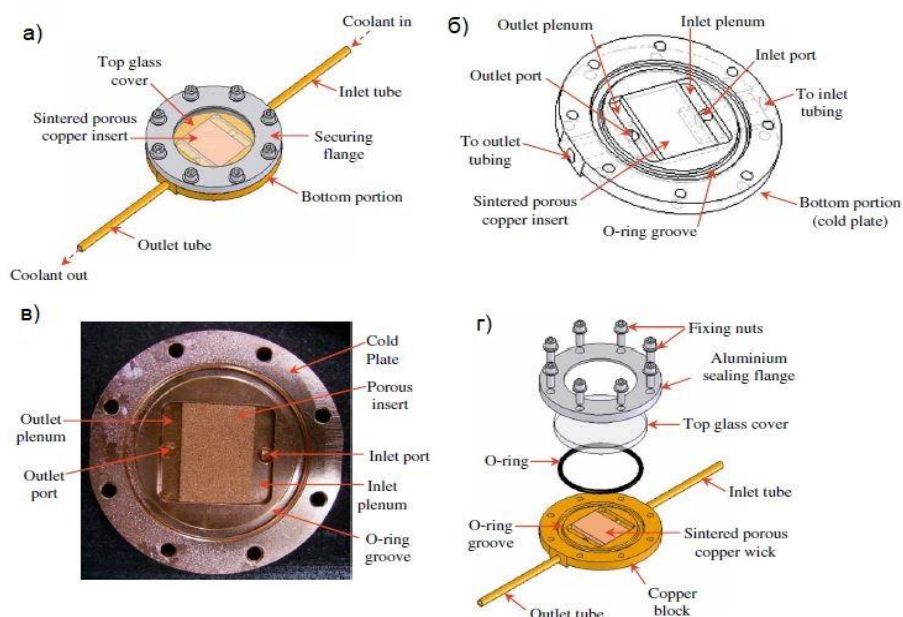


Рис. 9. Спеченный пористый радиатор [26]:

- а) тестовый прототип б) внутренние детали нижней части радиатора в) изображение секции охлаждения, показывающее пористую медную среду, прикрепленную внутри прямоугольного канала
г) разобранный вид узла радиатора, показывающий различные компоненты

В работах [27, 28] описаны теплогидравлические исследования оребренных радиаторов, радиаторов из металлической пены, а также комбинированных радиаторов с оребрением и металлической пеной (рис. 10) при охлаждении их воздушным потоком. После проведения многочисленных экспериментов с разными высотами пористых слоев и количеством ребер авторы приходят к выводу, что наилучшие тепловые характеристики демонстрируют образцы, комбинированные оребрением и пеной. Также была разработана численная модель для моделирования сопряженной теплопередачи между пластинчатыми ребрами и металлическими пенопластами в радиаторах, комбинированных оребрением и пеной. Влияние связующего материала между металлическими пенопластами и пластинчатыми ребрами, а также входные тепловые граничные условия были подробно обсуждены с использованием численной модели. Сравнение экспериментальных и численных результатов показывает, что использование ламинарной расширенной модели Дарси может справедливо предсказать как теплообмен, так и падение давления в радиаторах с металлической пеной и комбинированных оребрением и металлической пеной при высоких числах Re , если свойства пены заданы правильно. Однако авторами отмечается, что вставка металлического пеноматериала приводит к гораздо большему перепаду давления, чем при использовании обычных ребристых радиаторов. Но при этом авторы предлагают пренебрегать растущим перепадом давления из-за высоких тепловых показателей металлических пен в случаях, где энергопотребление насоса не является доминирующим фактором.

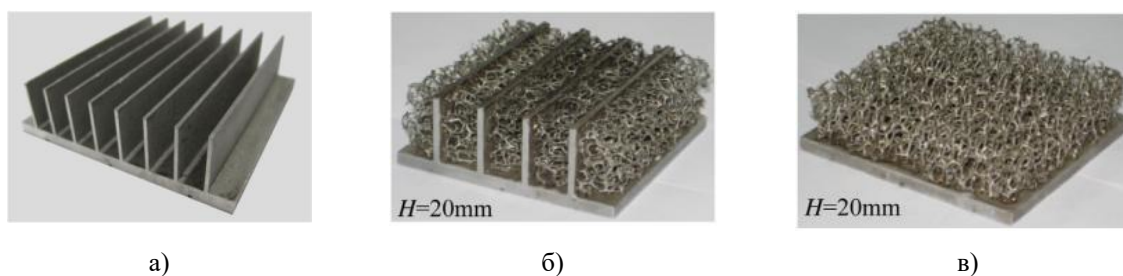


Рис. 10. Радиаторы [27, 28]:

- а) оребренный радиатор б) оребренный радиатор с пористой металлической пеной
в) радиатор из металлической пены

В работе [29] представлена конструкция теплообменника, разработанного для низкотемпературного охлаждения электроники средней плотности мощности и, в частности, для детекторов частиц «прямых» экспериментов на Большом адронном коллайдере (рис. 11). В теплообменнике используется металлическая пена для усиления внутренней теплоотдачи, он гальванически изолирован от трубок системы охлаждения и герметично закрыт. Заметным преимуществом этого теплообменника является то, что ту же конструкцию можно использовать с воздухом или испаряющимся хладагентом в качестве охлаждающей жидкости. Несколько прототипов были построены и испытаны как в лаборатории, так и при непосредственном применении в эксперименте. Разница температур между приточным воздухом и поверхностью теплообменника составляет 20°C при тепловой нагрузке 20 Вт, эта разница снижается до 10°C при использовании вместо воздуха хладагента R-218.



Рис. 11. Теплообменник для низкотемпературного охлаждения электроники средней плотности [29]:
а) внешний вид теплообменника б) основные геометрические параметры

Целью работы [30] было изучение особенностей теплопередачи и характеристик радиатора из алюминиевой пены (рис. 12) для процессора Intel Core i7. Радиатор из алюминиевой пены охлаждался водой при значении Re 297-1353. Нижняя сторона радиатора нагревалась с тепловым потоком от 8,5 до $13,8\text{ Вт/см}^2$. Распределения локальной температуры поверхности и локального числа Nu были измерены и сопоставлены с численными данными, полученными методом конечных элементов. Среднее число Nu было получено для диапазона чисел Re и также получена эмпирическая корреляция среднего числа Nu как функции числа Re . Результаты также сравнивались с результатами предыдущих экспериментальных исследований, в которых в качестве хладагента использовался воздух. Результаты показали, что вода в качестве теплоносителя обеспечивает более низкие средние температуры поверхности и более равномерный температурный профиль. Численные результаты хорошо согласовались с локальным числом Nu и локальной экспериментальной температурой с максимальной относительной погрешностью 0,83% и 0,43% соответственно.



Рис. 12. Охлаждение для процессора Intel Core i7 [30]:
а) тестовый теплообменник б) радиатор из алюминиевой пены

В работах [31, 32] проводились численные и экспериментальные исследования теплоотвода из алюминиевой пены (АФ) с жидкостным охлаждением, применимого для охлаждения мощной электроники. В работе [31] описывается исследование радиаторов АФ с пористостью 0,88 и плотностью пор 10 PPI и 20 PPI, а для сравнения используется пустой канал. В работе [32] радиатор АФ снабжается штыревыми ребрами (радиатор АФРФ) (рис. 13). Радиаторы подвергаются воздействию постоянного потока воды, охватывающего режим Дарси-Форхгеймера. В результате исследований выяснено, что радиаторы АФ демонстрируют теплоотдачу в 1,4-1,76 раз больше, чем пустой канал при одинаковых расходах. Повышение теплопередачи пеной с плотностью 20 PPI незначительно, примерно 5%, по сравнению с пеной с плотностью 10 PPI. Результаты также показывают, что установка штыревых ребер в радиатор АФ оказывает значительное влияние как на характеристики потока, так и на характеристики теплопередачи. Эффективность теплопередачи как АФРФ, так и радиаторов АФ увеличивается с увеличением плотности пор. Улучшение среднего числа Nu в радиаторе АФРФ 20 PPI составляет примерно 63,5–68,1% по сравнению с радиатором АФ, в то время как вычисленное сопротивление потоку увеличивается на 49,2–88,1%. Установлено, что тепловые характеристики радиатора АФРФ в 1,5 раза превышают теплоотвод АФ при заданной мощности накачки.

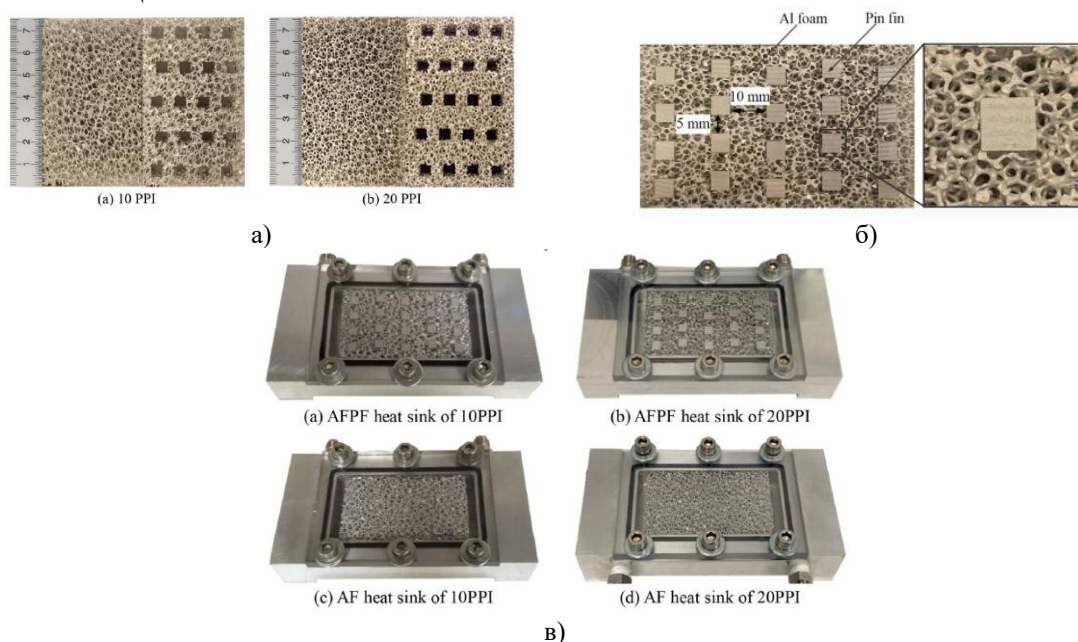


Рис. 13. Теплоотвод из алюминиевой пены [32]:
а) образцы алюминиевого пенопласта с различной плотностью пор 10 PPI и 20 PPI
б) увеличенный вид соединения пенопласта/ребрения в) фотографии радиаторов АФРФ и АФ

Отдельного внимания заслуживают варианты интенсификации теплообмена в микроканальных радиаторах. Распространенным в литературе способом повышения эффективности представляется изменение формы каналов радиаторов [33–35]. Так, согласно работе [35], при достижении оптимальных параметров исследуемого волнистого канала радиатора можно улучшить значение теплопередачи в 2,8 раза по сравнению с гладким каналом (рис. 14).

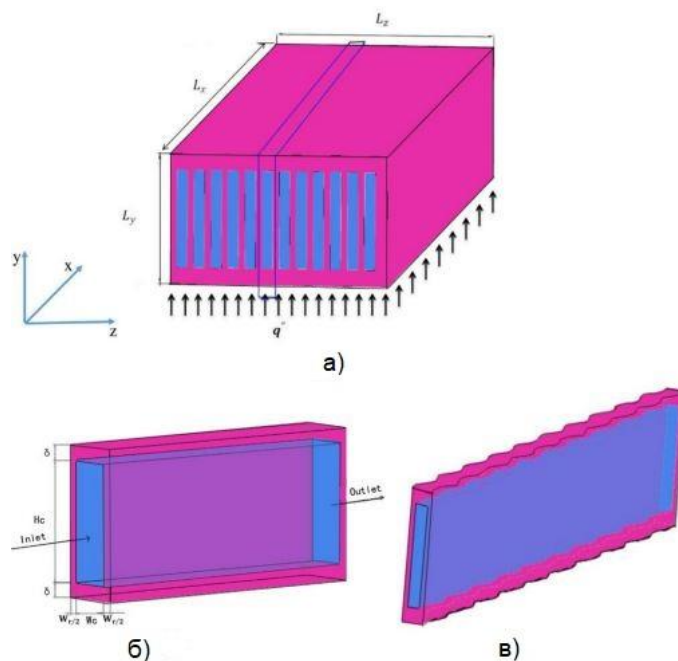


Рис. 14. Схема каналов радиатора [35]:

а) микроканальный радиатор б) прямой микроканал в) волнистый микроканал

Значительное улучшение теплообменных показателей в микроканальных радиаторах также можно достичь с применением ребер в микрокамерах [36, 37]. В данных работах описано, что для чисел Re в диапазоне от 187 до 715 число Nu увеличивается на 24–57 % для прерывистых микроканальных радиаторов с ребрами, а коэффициент трения увеличивается на 3–70 % по сравнению с прямым микроканальным радиатором.

В работе [38] рассматривались каналы с гибридной технологией ребер и вторичных каналов (рис. 15). Изучались характеристики потока и теплопередачи микроканальных радиаторов при числах Re от 100 до 500. Проведен сравнительный анализ эффективности предлагаемых конструкций с гибридной геометрией с микроканалами с прямоугольными ребрами (MC-RR) и микроканалами со вторичными косыми каналами (MC-SOC). Результаты подчеркнули превосходство общей производительности MC-SOCRR над MC-RR и MC-SOC. Использование вторичных каналов с ребрами способствовало снижению падения давления примерно на 50 % по сравнению с падением давления, вызванным ребрами в MC-RR, за счет увеличения площади проходного сечения. Кроме того, эта конфигурация способствовала устранению зоны застоя, существующей во вторичном канале. Предлагаемая конструкция обеспечивает большую площадь теплопередачи по сравнению с микроканалами соответствующей геометрии, такими как MC-RC, MC-RR и MC-SOC. Увеличение хаотичной адвекции и перемешивания потоков между соседними основными каналами существенно усиливает теплообмен.

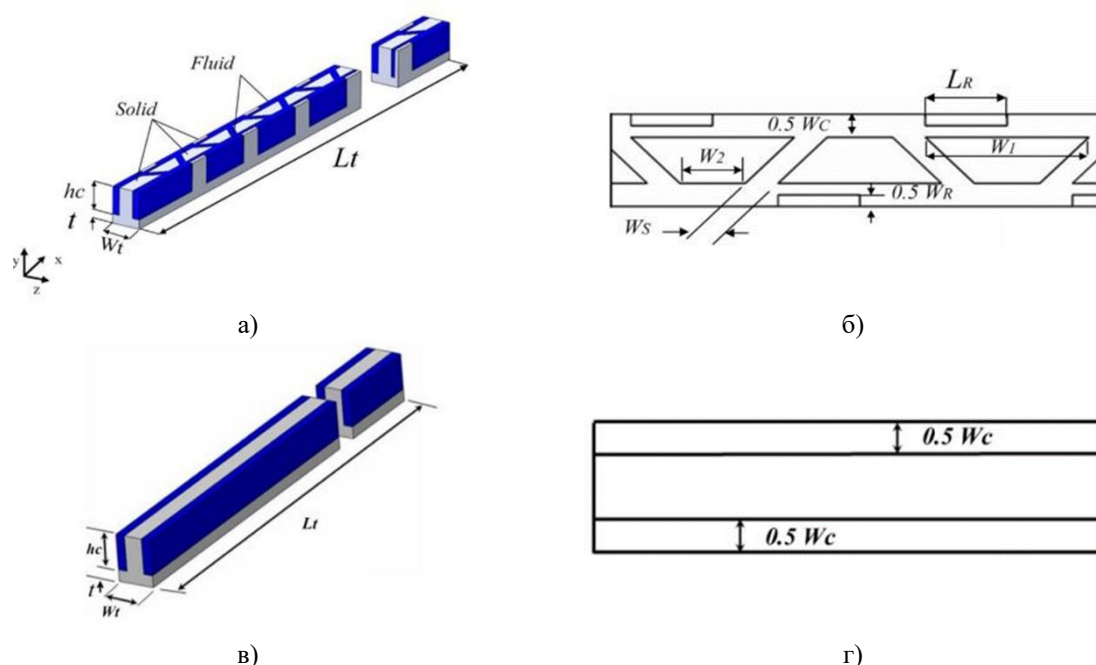


Рис. 15. Каналы с гибридной технологией ребер и вторичных каналов [38]:
 а) принципиальная схема MC-SOCRR б) геометрические параметры MC-SOCRR
 в) принципиальная схема MC-PC г) геометрические параметры MC-PC

В статье [39] рассмотрено влияние встроенных в микроканальный радиатор пластин Y-образной формы, а также дополнительно исследовано влияние углов раствора Y-образных пластин. По результатам исследования сделан вывод, что внутренние Y-образные бифуркационные микроканальные радиаторы имеют лучшие тепловые характеристики, чем прямоугольные прямые микроканальные радиаторы. Также отмечается, что благодаря использованию Y-образного разветвления термическое сопротивление снизилось на 41,02% по сравнению с прямоугольным прямым микроканалом при скорости на входе 1,00 м/с. Результаты работы показывают, что микроканал с внутренним Y-образным разветвлением под углом 180° дает наилучшие тепловые характеристики.

Наиболее интересный и эффективный способ интенсификации процессов теплообмена в микро- и макроканалах заключается в использовании высокотеплопроводных пористых материалов. В работе [40] авторами продемонстрирован вариант интенсификации теплообмена в ранее упоминаемых сэндвич-панелях. В исследовании предлагается стратегия наполнения гофрированных сэндвич-панелей металлической пеной с открытыми порами для создания сэндвич-структуры со сверхлегкими несущими нагрузками и возможностями теплопередачи. Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что использование металлической пены значительно улучшает теплообменные возможности сэндвич-конструкций. По сравнению с обычными гофрированными сэндвич-панелями число Nu металлической пены в канале и комбинирования гофрирования с металлической пеной при числе Re равном 240, было увеличено на 51,3% и 102,3% соответственно. Общие тепловые характеристики композитов «комбинирования гофрирования с металлической пеной» были оптимизированы при тех же ограничениях по мощности накачки. В турбулентных условиях общие тепловые характеристики композитов «комбинирования гофрирования с металлической пеной» были на 5,9–55,4% выше, чем у гофрированных сэндвич-конструкций в турбулентных условиях.

Работа [41] посвящена изучению термогидравлических характеристик вынужденного конвективного течения наножидкости Cu-вода внутри гофрированного канала с однослойной пористой алюминиевой пеной в сердцевине с различными гофрированными профилями, а именно: треугольным, синусоидальным и трапециевидным. В ходе исследования было выявлено, что скорость теплопередачи является самой высокой при использовании трапециевидного гофрированного канала, тогда как треугольный гофрированный канал обеспечивает наименьшую скорость теплопередачи. В работе отмечается, что внедрение гофрированного профиля, частично заполненного металлической пористой пеной, значительно увеличивает скорость теплопередачи независимо от числа Re и объемной доли наножидкости.

В исследовании [42] изучаются трехмерные модели пористо-микроканальных радиаторов с различными конструктивными решениями, такими как: прямоугольный пористый канал; расширение пористого канала к выходу; трапециевидная пористая ставка в канале; слой пористой среды в канале; блоки пористой среды в канале; сэндвич-проекты конфигурации распределения пористой среды (рис. 16). В исследовании отмечается, что сэндвич- и трапецеидальные конструкции имеют лучшую эффективность теплопередачи и эффективность охлаждения, а с учетом тепловых характеристик и перепада давления конструкция сэндвич-распределения является лучшей конструкцией пористого микроканального радиатора из шести рассмотренных конфигураций.

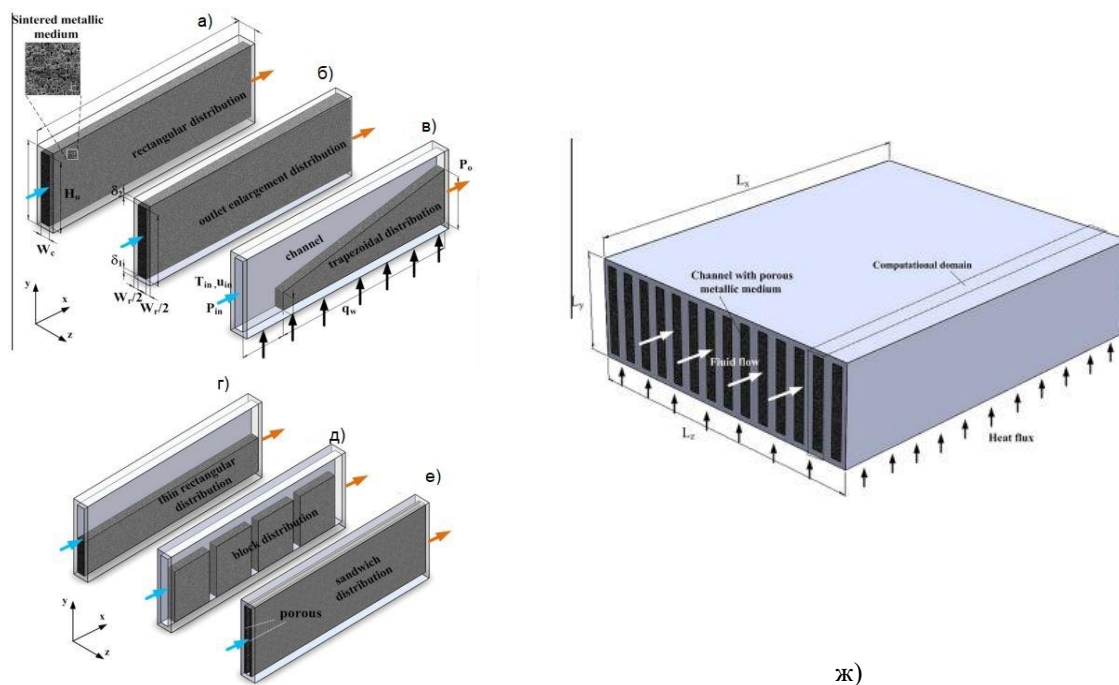


Рис. 16. Принципиальные схемы расчетных областей [42]:

- а) прямоугольный пористый канал б) расширение пористого канала к выходу в) трапециевидная пористая ставка в канале г) слой пористой среды в канале д) блоки пористой среды в канале
- е) сэндвич-проекты конфигурации распределения пористой среды
- ж) принципиальная схема пористого микроканального радиатора

В исследовании [43] рассматривается конвективная теплопередача и тепловые характеристики микроканальных радиаторов с различной структурой металлических пенопластов, таких как: Y-образная металлическая пена; металлическая пена, полностью заполняющая канал; комбинированная металлическая пена (рис. 17).

В работе установлено, что различные конфигурации и расположение металлического пеноматериала в микроканале приводят к различным характеристикам теплопередачи. Микроканальные радиаторы с комбинированной металлической пеной имеют лучшие общие тепловые характеристики, чем две другие модели, поскольку они обладают преимуществами смешивания потоков жидкости, создаваемых металлической пеной Y-образной формы, и тесного контакта с ребрами.

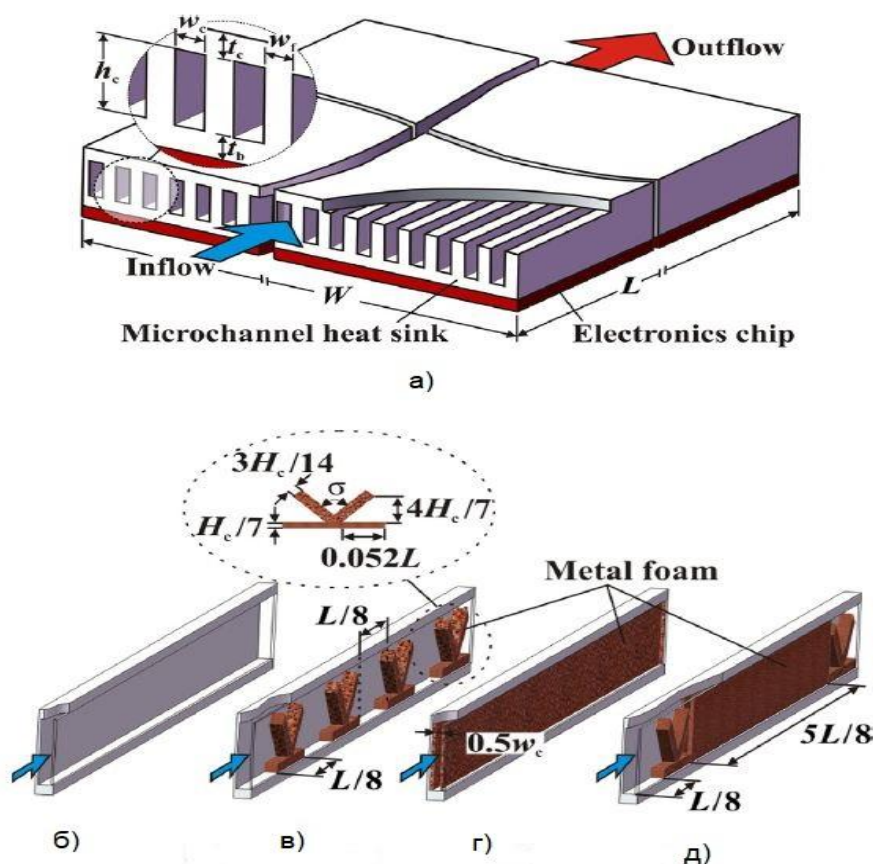


Рис. 17. Схематическая иллюстрация исследуемой задачи [43]:

- а) общая конфигурация микроканального радиатора б) сечение микроканала без пены
 в) сечение микроканала с Y-образными пеноблоками г) металлическая пена, полностью заполняющая канал д) комбинированная металлическая пена

Интенсификация теплообмена неоднородными и анизотропными пористыми средами. Одним из перспективных направлений развития исследований теплогидравлических свойств пористых материалов является изучение свойств анизотропных и неоднородных пористых структур. Данное направление представляется одним из возможных способов дальнейшего повышения эффективности теплогидравлических показателей однородных пористых структур. Варианты применения пористых вставок с переменной пористостью (неоднородных) или переменной удельной поверхностью для уменьшения потерь давления были упомянуты в работе [9]. В работе [44] описываются экспериментальные исследования характеристик новых пористых структур с переменной пористостью для водяного охлаждения (рис. 18). По словам авторов, предлагаемая ими переменная пористая структура демонстрирует гораздо меньший перепад давления, чем традиционная металлическая пена, и одновременно увеличивает показатели теплопередачи.

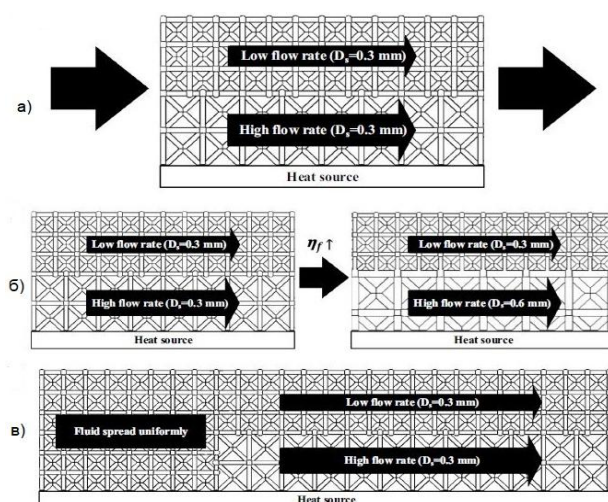


Рис. 18. Пористые структуры с переменной пористостью для водяного охлаждения [44]:

- а) схема неоднородной пористой структуры
- б) схема неоднородной пористой структуры с повышенной эффективностью ребер
- в) схема неоднородной пористой структуры с повышенной эффективностью ребер и компактностью входного отверстия

В исследовании [45] изучались алюминиевые пены с переменным размером пор при охлаждении их воздухом и сделан вывод, что градуированные пористые структуры могут дать улучшенные тепловые и гидравлические характеристики. В работе [46] авторами исследовался теплообмен при кипении в бассейне металлических пен с градиентной плотностью пор при атмосферном давлении в насыщенной деионизированной воде, где сделан вывод о влиянии толщины пены и плотности пор в градиентном материале на подобные процессы. В работе [47] моделируется поглотитель солнечной энергии с переменной пористой структурой, улучшающий показатели эффективности. Рассмотрим некоторые работы, касающиеся численного моделирования теплогидравлических процессов при однофазном охлаждении поверхностей с использованием градиентной, переменной, неоднородной или композиционной пористой среды.

В работе [48] исследовались проводящие металлические периодические открытые ячеистые структуры (POCS), считающиеся перспективным решением для интенсификации каталитических процессов с ограниченной теплопередачей благодаря их повышенной теплопроводности. Здесь теплопроводность в твердой матрице исследовалась посредством трехмерного численного моделирования. Пористость вместе с собственной проводимостью материала оказывают основное влияние на эффективную теплопроводность, при этом обнаруживается незначительное влияние формы и размера ячеек. Корреляция, полученная ранее для описания пенопластов с открытыми порами, показывает превосходное соответствие с результатами для структур POCS.

В исследовании [49] с целью увеличения однородности температурного поля внутриципового охлаждения микроканального радиатора было предложено градиентное оребрение (рис. 19). В работе установлено, что существующая конструкция градиентного распределения может обеспечить максимальный тепловой поток 140 Вт/см^2 , что на 30 Вт/см^2 больше, чем у равномерно распределенного оребрения. Также существующая конструкция градиентного оребрения способствует увеличению однородности температурного поля в канале.

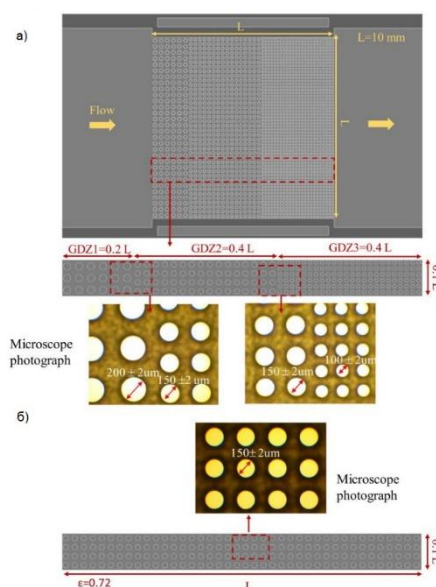


Рис. 19. Схема и СЭМ-изображения двух протестированных микрофлюидных чипов [49]:
а) MPFA-VD200-150-100; б) MPFA-CD150

В работе [50] была предложена и численно исследована новая конфигурация труб, заполненных пористым материалом с градиентом пористости (GPM) с целью повышения эффективности теплопередачи труб. Было изучено влияние как градиента размера пор, так и градиента пористости на теплопередачу и сопротивление течению. Результаты показывают, что градиент размера пор или градиент пористости в направлении Z (рис. 20) оказывает ограниченное влияние на поток жидкости и характеристики теплопередачи по сравнению с конфигурациями НРМ как в частично, так и в полностью заполненных трубах. Однако градиент размера пор в R -направлении при частичном и полном заполнении значительно улучшает как течение жидкости, так и характеристики теплопередачи. Градиент уменьшения размера пор в направлении R при частичном заполнении и градиент увеличения размера пор по R при полном заполнении могут значительно улучшить теплопередачу при относительно низком перепаде давления. Эти результаты показывают, что существует подходящая конфигурация GPM с определенным размером пор, позволяющая улучшить теплообмен с уменьшенным коэффициентом трения по сравнению с традиционными конфигурациями однородных пористых материалов (НРМ).

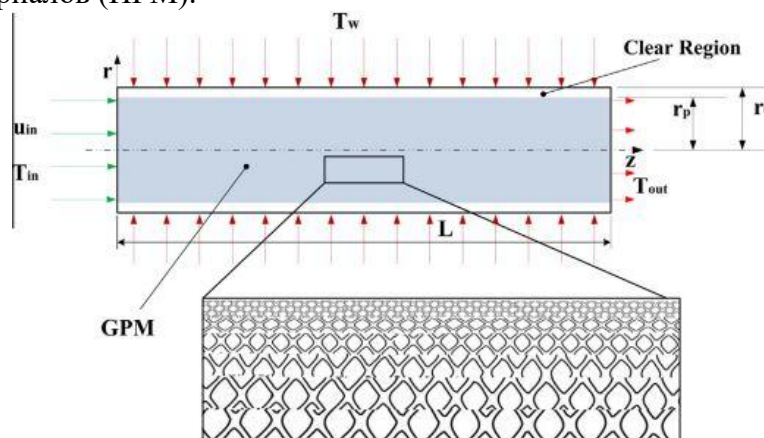


Рис. 20. Схема представленной задачи [50]

В работах [51, 52] описаны исследования вынужденной конвекции в трубах, с частично заполненными градиентной металлической пеной (ГМП) (рис. 21). В работах изучались распределение скоростей, профиль температуры, коэффициент трения и число Nu в частично заполненных трубах. Результаты данных исследований показывают, что характеристики теплопередачи и сопротивление потоку ГМП сильно зависят от пористости, плотности пор и градиента толщины ГМП. В работе [52] также отмечалось, что градиент пористости мало влияет на коэффициент трения при низкой плотности пор, но эффект увеличивается с увеличением плотности пор. Для фиксированного градиента плотности пор число Nu уменьшается с увеличением пористости, а число Nu сначала резко возрастает, а затем линейно возрастает с увеличением числа Re . Для фиксированного градиента материала число Nu увеличивается линейно с увеличением числа Re .

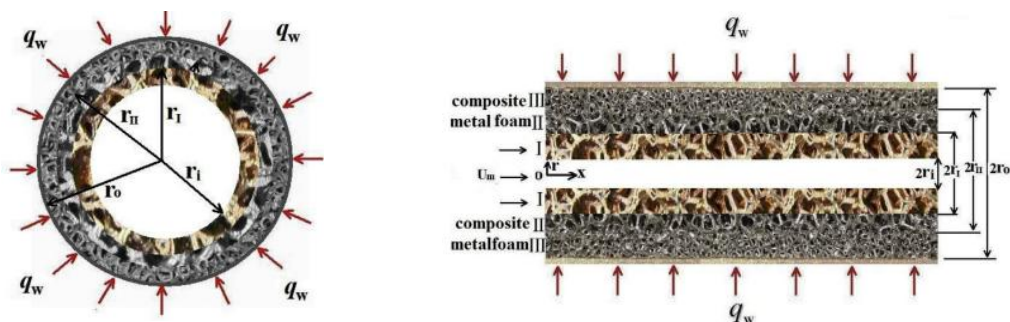


Рис. 21. Трубка, частично заполненная трехуровневым пеноматериалом [52]

В работе [53] с помощью численного моделирования исследуются характеристики потока и теплопередачи для полностью развитого потока в трубе, частично заполненной градиентными пористыми средами. В поставленной задаче (рис. 22) размер пор и пористость изменяются линейно вдоль радиуса, а также выполняется сравнение четырех конфигураций, классифицированных по распределению размера пор и пористости в радиальном направлении для исследования разницы в характеристиках потока и теплопередачи. Результаты показывают, что конфигурации с уменьшающимся в радиальном направлении размером пор имеют лучшие характеристики теплопередачи. После оптимизации градиентной пористой конструкции авторы делают вывод, что сопротивление потоку может быть снижено до 19,573%, а эффективность теплопередачи может быть увеличена до 7,088% по сравнению с однородной пористой средой при коэффициенте заполнения 0,7.

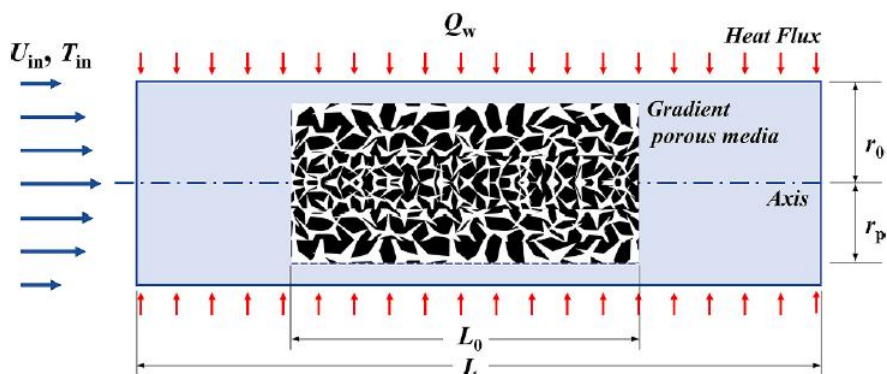


Рис. 22. Схематическое описание расчетной области и граничных условий [53]

Работа [54] посвящена изучению эффективности использования градиентных и многослойных пористых сред с оптимизированными конструктивными свойствами для получения максимальных значений теплопередачи и минимизации падения давления. Процессы в данном исследовании моделируются с помощью программного комплекса ANSYS-FLUENT, где задаются свойства пористого материала. В работе рассматриваются варианты с постоянной пористостью, простое расположение пористых слоев, в том числе постоянное, линейное или ступенчатое. При помощи алгоритма «Particle swarm optimization» производится поиск оптимизированного расположения пористых слоев и их оценка по критерию эффективности. Результаты показывают, что оптимальное расположение слоев дает значения критерия оценки эффективности до значения 0,856. Также авторами отмечается, что использование наножидкости оксид алюминия/вода (5%) в совокупности с одновременным использованием оптимизированных условий может улучшить критерий эффективности примерно в 3 раза.

В исследовании [55] анализируются характеристики потока жидкости и теплопередачи радиатора, частично снабженного многослойной пористой средой. Многослойная медная пена содержит три различных слоя, размещенных на нижней стенке радиатора, подвергающихся равномерному тепловому потоку (рис. 23). Весь занимаемый объем пористой области составляет 60% канала. Основная цель текущего исследования — выявить схему расположения пористой среды с оптимальной толщиной для каждого слоя в двух предложенных моделях для максимизации теплопередачи и минимизации падения давления. В модели постоянного диаметра частиц все три слоя имеют одинаковый диаметр частиц 1,5 см с тремя значениями пористости 0,95, 0,85 и 0,75 снизу вверх. В модели постоянной пористости все три слоя имеют одинаковую пористость 0,95 с тремя значениями диаметра частиц 0,5, 1 и 1,5 см снизу вверх. Для компромисса между желаемыми (теплопередача) и нежелательными (падение давления) результатами определяется безразмерное число критерия оценки производительности (PEC). Модели Дарси–Бринкмана–Форхгеймера и локальной тепловой неравновесности применяются для решения основных уравнений в пористой области. Численное моделирование проводится для анализа влияния толщины каждого слоя многослойной пористой среды в двух предложенных моделях на термогидравлические параметры, такие как коэффициент трения, число Nu и критерий эффективности PEC. При оптимальных компоновках пористой среды применяется гибридная наножидкость вода-графеновые нанопластины/платина для улучшения тепловых характеристик радиатора. Полученные результаты показывают, что наибольшее число PEC достигается в модели постоянной пористости, равной 1,17, в случае, когда толщина нижнего, среднего и верхнего слоя металлической пены составляет 0,6, 1 и 0,2 см соответственно, что приводит к 145% улучшению теплопередачи. В модели постоянного диаметра частиц наибольшее число PEC равно 1,26 в случае, когда где толщина нижнего, среднего и верхнего слоя металлической пены составляет 1, 0,6 и 0,2 см соответственно, что приводит к увеличению теплопередачи на 191% по сравнению с простым каналом. Дальнейшее увеличение числа PEC наблюдается при добавлении наночастиц к базовой жидкости для объемной концентрации наножидкости 0,1% в моделях с постоянной пористостью и диаметром частиц, которые равны 1,22 и 1,31 соответственно.

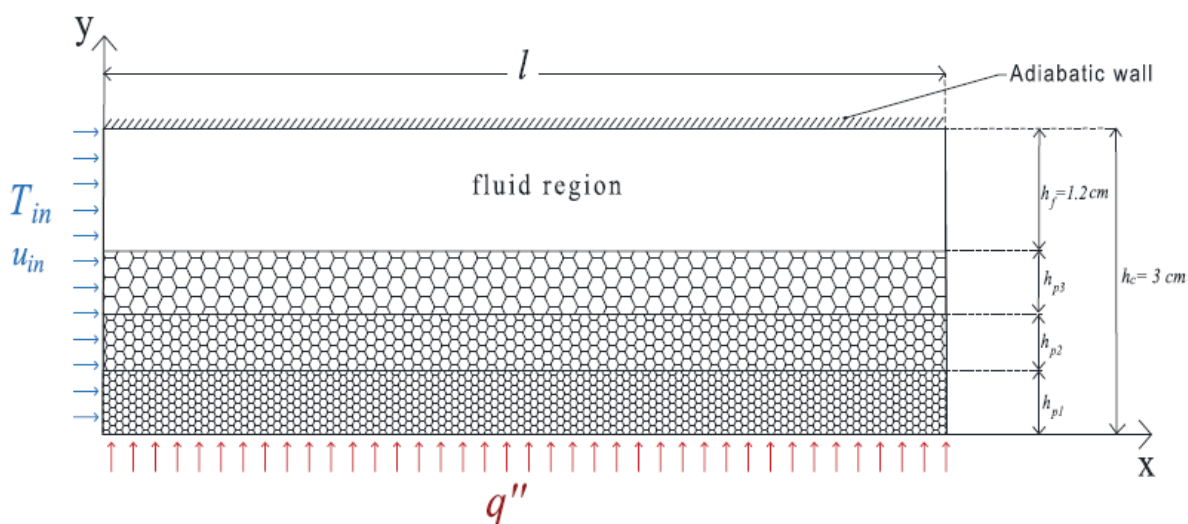


Рис. 23. Эскиз функционально-градуированного пенопласта с открытыми порами [55]

В работе [56] численно исследовалась конструкция градиентно-пористого радиатора (рис. 24). Изучалось влияние конфигурации градиентного пористого материала (ГПМ) на гидравлические и тепловые характеристики радиаторов по сравнению с гомогенно-пористым радиатором. Исследование проводилось для ламинарного режима течения при числе Re от 200 до 1000, в котором рассматривались четыре различных конфигурации ГПМ: с диаметром пор (dp) от 0,03 м до 0,016 м по оси Y , от 0,016 м до 0,001 м по оси Y , от 0,001 м до 0,016 м по оси Y и от 0,016 м до 0,001 м по оси Z и сравнивались с постоянными значениями $dp = 0,001$ м, $dp = 0,0085$ м и $dp = 0,016$ м. В работе установлено, что по сравнению с обычным гомогенно-пористым радиатором, градиентно-пористый материал с изменением диаметра пор по оси Y может одновременно эффективно улучшить гидравлические и тепловые характеристики. И делается вывод о том, что градиентно-пористые конструкции обладают возможностями эффективного уменьшения температуры нижней стенки.

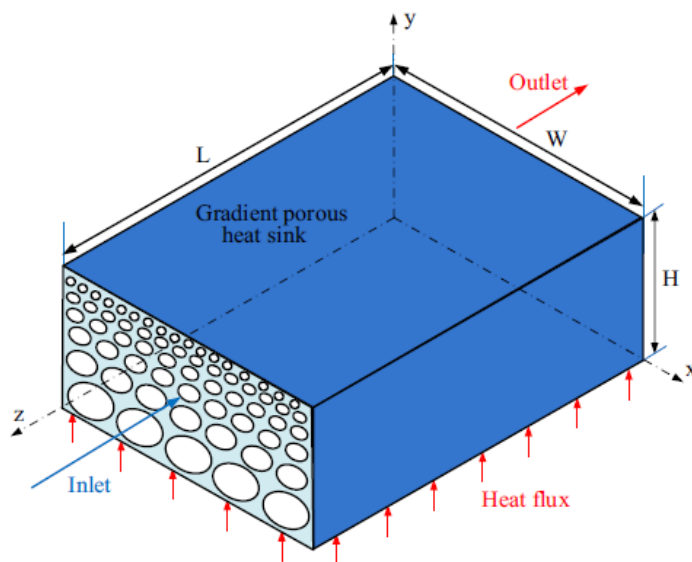


Рис. 24. Принципиальная схема расчетной области GPHS [56]

В исследовании [57] изучалось влияние переменной пористости и размера ячеек на тепловые характеристики функционально-сортированных пенопластов. В работе численно исследованы теплообмен и перепад давления в функционально-градиентной пене (рис. 25), при входящем на одну из ее сторон однородном тепловом потоке. Рассмотрены пористость и размер ячеек, изменяющиеся в направлении входящего теплового потока по различным степенным функциям; их максимальное и минимальное значения ограничены на противоположных верхней и нижней сторонах пенопласта. Основные уравнения, записанные со ссылкой на репрезентативный элементарный объем пены, решаются с помощью модели локального термического неравновесия с помощью схемы конечных элементов; код проверен экспериментальными данными из литературы. Термические характеристики пены выражаются критерием оценки эффективности, который относится к средним морфологическим характеристикам пенопласта с одинаковой площадью поверхности. Прогнозируются числа Nu , коэффициенты трения и критерии оценки эффективности для различных степенных законов. В пенопластах с переменной пористостью обнаружено увеличение критерия оценки эффективности на 38% по сравнению с пенопластами с однородной пористостью, тогда как в пенопластах с переменным размером ячеек обнаружено увеличение критерия оценки эффективности на 14%. Увеличение критерия оценки эффективности на 42% обнаружено в пенопластах, которые имеют как переменную пористость, так и размер ячеек.

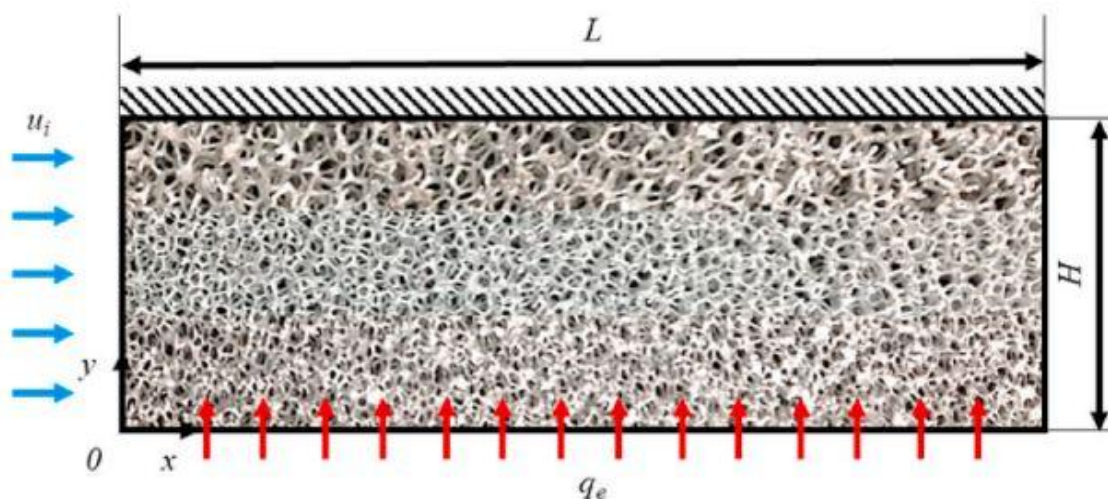


Рис. 25. Эскиз функционально-градуированного пенопласта с открытыми порами [57]

Большое количество исследований с численным моделированием и сравнительно небольшое количество экспериментальных исследований вариантов применения неоднородных пористых конструкций может быть объяснено сложностью их производства. Однако, в последнее время всё чаще можно встретить работы, в которых упоминаются сложные металлические конструкции, в том числе с изменяемой пористостью, описанные в [58] и др. Так, в работах [59, 60] описывается создание и исследование механических свойств градиентных структур, имитирующих кости человеческого тела, в качестве перспективного направления для создания биомедицинских имплантов. Радиально-градиентные структуры, применяемые в данном исследовании, созданы с использованием аддитивного производства (3D-печати) с помощью селективного лазерного плавления. В данных исследованиях, к примеру, были созданы решетчатые структуры как с постоянной, так и с переменной пористостью (рис. 26).

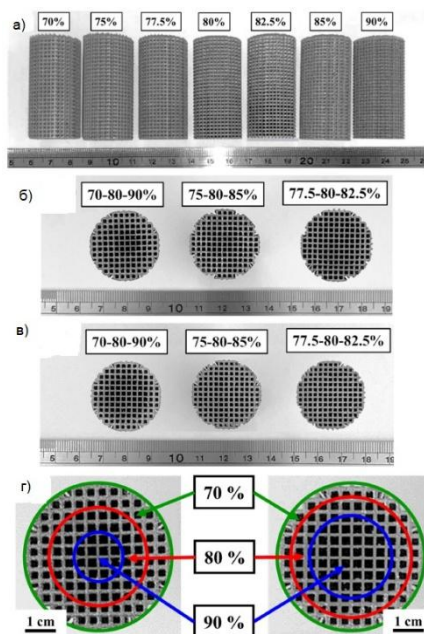


Рис. 26. Пористые материалы, изготовленные с использованием SLM [60]:

- а) изготовленные пористые образцы с единичной пористостью от 70% до 90%
- б) изготовленные радиально-градиентные пористые образцы с одинаковой толщиной области
- в) изготовленные радиально-градиентные пористые образцы с одинаковой объемной долей области
- г) увеличенные схематические иллюстрации 3D-печатных радиально-градиентных пористых образцов с одинаковой толщиной области (слева) и одинаковой объемной долей области (справа), которые показывают разные размеры распорки в областях с разной пористостью

Иные геометрически сложные конструкции, производство которых осуществляется с помощью аддитивных 3D-технологий, также описываются исследовании [61], где изучается внедрение ячеистых структур на основе тройных периодических минимальных поверхностей (TPMS) в качестве теплоотводящего материала в электронных устройствах в условиях естественной свободной конвекции (рис. 27). В вышеупомянутом исследовании отмечается, что что радиаторы на основе TPMS превосходят традиционные радиаторы на 48–61% благодаря случайным возмущениям потока и высокой плотности упаковки.

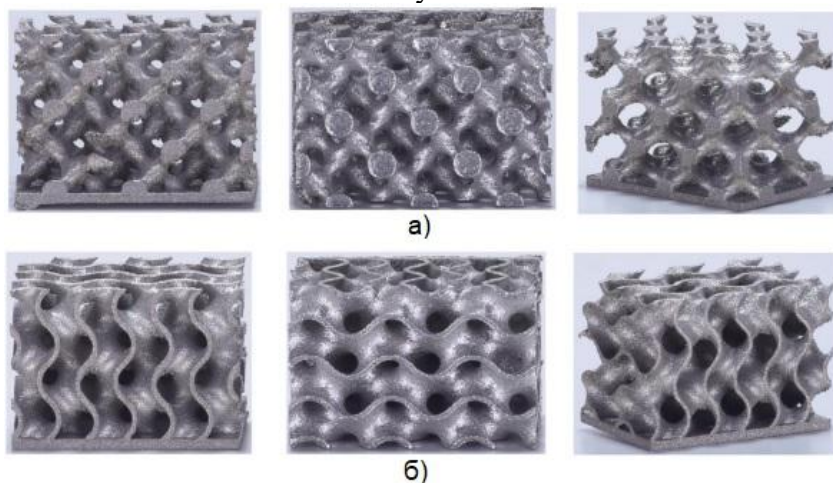


Рис. 27. Примеры 3D-напечатанных радиаторов AlSi10Mg [61]:

- а) различные виды 3D-напечатанного радиатора со сплошными сетками Diamond
- б) различные виды 3D-напечатанного радиатора из листовой сети Gyroid

Заключение. Таким образом, из рассмотренного в данной работе материала можно полагать, что эффективный теплоотвод в компактных теплообменных устройствах можно обеспечить применением пористых материалов в качестве интенсификаторов. Также стоит отметить, что перспективным направлением дальнейшего повышения эффективности подобных устройств является применение неоднородных пористых материалов, характеризующихся неоднородностью геометрических параметров пористой структуры или ее физических характеристик. Большинство исследований тепловых свойств неоднородных и анизотропных структур посвящены численному моделированию процессов, а верификация используемых численных модулей производится преимущественно сравнением с результатами существующих исследований, касающихся либо однородных пористых материалов, либо неоднозначно градиентных пористых материалов. При всем многообразии исследований неоднородных пористых материалов, достаточный массив экспериментальных данных отсутствует, и проверка получаемых путем численного моделирования результатов является не достаточно однозначной и требует экспериментальных подтверждений. В связи с развитием аддитивных технологий и возможностей 3D-печати, в настоящее время имеется достаточно возможностей создания различных конфигураций пористых структур из высокотеплопроводных материалов для проведения экспериментальных исследований и формирования необходимого массива данных для валидации проводимых путем численного моделирования исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасьева, И. В. Перспективные методы оребрения теплообменных аппаратов / И. В. Афанасьева // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 7. – С. 114-121. – EDN IRZSIJ.
2. Оптимизация конструкции теплообменного аппарата с целью повышения эффективности теплообмена / О. Л. Ерин, В. В. Черниченко, Е. А. Орехов [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06–07 июня 2019 года. Том Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. – С. 78-85. – EDN GJPOKP.
3. Шкварец, Р. В. Обзор методов интенсификации турбулентного движения потока продуктов сгорания в дымогарных трубах жаротрубных котлов / Р. В. Шкварец, А. А. Гаврилов // Матрица научного познания. – 2019. – № 12. – С. 64-70. – EDN ZITRBJ.
4. Study of intensification of the heat transfer in helically coiled tube heat exchangers via coiled wire inserts / E. Gholamalizadeh, E. Hosseini, M. B. Jamnani [et al.] // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – V. 141. – P. 72-83. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.029.
5. Performance intensification of tubular heat exchangers using compound twisted-tape and twisted-tube / M. Khoshvaght-Aliabadi, A. Feizabadi // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. – 2020. – V. 148. – DOI 10.1016/j.cep.2019.107799.
6. Performance intensification of turbulent flow through heat exchanger tube using double V-cut twisted tape inserts / M.E. Nakhchi, J.A. Esfahani // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. – 2019. – V. 141. – DOI 10.1016/j.cep.2019.107533.
7. Рыдалина, Н. В. Применение пористых металлов в конструкциях теплообменных аппаратов / Н. В. Рыдалина, О. А. Степанов, Е. О. Антонова // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 1. – EDN WEKIQP.
8. Николенко, К. В. Конструктивные особенности рекуперативных теплообменников на базе пористых элементов / К. В. Николенко, А. В. Николенко, В. В. Курсин // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей LXV Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 июня 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 40-42. – EDN XJHNNQ.
9. Попов, И. А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах / И. А. Попов ; Под общей редакцией Ю.Ф. Гортышова. – Казань : ООО "Центр инновационных технологий", 2007. – 240 с. – (Интенсификация теплообмена). – ISBN 978-5-93962-257-8. – EDN VLAPBL.

10. Пелевин, Ф. В. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя / Ф. В. Пелевин, А. В. Пономарев, П. Ю. Семенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 6(663). – С. 74-81. – EDN TVWDBD.
11. Conjugate forced convective heat transfer in a sandwich panel with a Kagome truss core: The effects of strut length and diameter / U. Kemerli, K. Kahveci // Applied Thermal Engineerin. – 2020. – V. 167. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.114794.
12. Comparative evaluations of thermofluidic characteristics of sandwich panels with X-lattice and Pyramidal-lattice cores / X. Jin, B. Shen, H. Yan [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 127, Part B. – P. 268-282. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.087.
13. Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, Н. В. Корнев [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 3. – С. 390. – DOI 10.7868/S0040364415030060. – EDN TQQVTX.
14. Исаев, С. А. Обобщение материалов по моделированию вихревого теплообмена при обтекании одиночной лунки / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, М. Е. Гульцова // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 27–31 октября 2014 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 1072-1076. – EDN VDJRTZ.
15. Исаев, С. А. Сравнение по теплогидравлической эффективности симметричных и несимметричных форм лунок для интенсификации теплообмена / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, А. В. Щелчков // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении : Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова, Казань, 13–15 сентября 2016 года. – Казань: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский научный центр Российской академии наук, 2016. – С. 18-21. – EDN ZIKYIJ.
16. Патент № 2684303 С1 Российская Федерация, МПК F28F 3/04. Теплообменная поверхность : № 2018121892 : заявл. 13.06.2018 : опубл. 05.04.2019 / С. А. Исаев, П. А. Баранов, Ю. Ф. Гортышов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ" (КНИТУ-КАИ). – EDN IUOLQD.
17. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала / С. А. Исаев, М. С. Грицкевич, А. И. Леонтьев [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 5. – С. 797-800. – DOI 10.1134/S0040364419040082. – EDN DSKPAK.
18. Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овально-траншейными лунками для воздушных конденсаторов / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, О. О. Мильман [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2020. – № 4. – С. 3-10. – DOI 10.31857/S0002331020040032. – EDN NSHCEB.
19. Современные подходы к разработке и созданию элементов систем тепловой защиты радиоэлектронных компонентов / Д. А. Коновалов, И. Н. Лазаренко, И. Г. Дроздов, Д. П. Шматов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 97-104. – EDN RWUBVD.
20. Коновалов, Д. А. Моделирование процессов тепломассопереноса в микроканальных теплообменниках систем управления космической техники / Д. А. Коновалов, Н. Н. Кожухов, И. Г. Дроздов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 137-146. – EDN VUSDWZ.
21. Performance enhancement and comprehensive experimental comparative study of cold plate cooling of electronic servers using different configurations of mini-channels flow / O.S. Osman, R.M. El-Zoheiry, M. Elsharnoby, S.A. Nada // Alexandria Engineering Journal. – 2021. – V. 60. – P. 4451-4459. – DOI 10.1016/j.aej.2021.03.027.
22. Application of an ecofriendly nanofluid containing graphene nanoplatelets inside a novel spiral liquid block for cooling of electronic processors / M. Bahiraei, N. Mazaheri // Energy. – 2020. – DOI 10.1016/j.energy.2020.119395.
23. Using spiral channels for intensification of cooling process in an innovative liquid block operated with a biologically produced nanofluid: First and second law analyses / M. Bahiraei, N. Mazaheri // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. – 2021. – V. 162. – DOI 10.1016/j.cep.2021.108326.
24. Topology optimization and numerical analysis of cold plates for concentrating photovoltaic thermal management / L. Xie, H. Li, Y. Zhang [et al.] // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – V. 52. – DOI 10.1016/j.csite.2023.103713.
25. Heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks with a solid aluminum core / W.H. Shih, C. C. Liu, W. H. Hsieh // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 97. – P. 742-750. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.044.

26. Sintered porous heat sink for cooling of high-powered microprocessors for server applications / R. Singh, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2009. – V. 52. – P. 2289-2299. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.11.016.
27. An experimental and numerical study of finned metal foam heat sinks under impinging air jet cooling / S.S. Feng, J.J. Kuang, T. Wen [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 77. – P. 1063-1074. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.053.
28. Experimental investigation of heat transfer and flow characteristics in finned copper foam heat sinks subjected to jet impingement cooling / J. Wang, H. Kong, Y. Xu, J. Wu // *Applied Energy*. – 2019. – V. 241. – P. 433-443. – DOI 10.1016/j.apenergy.2019.03.040.
29. Universal heat exchanger for air and evaporative cooling of electronics / M. Doubek, V. Vacek // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2021. – V. 77. – DOI 10.1016/j.tsep.2021.100865.
30. Electronic cooling using water flow in aluminum metal foam heat sink: Experimental and numerical approach / A.M. Bayomy, M.Z. Saghir, T. Yousefi // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – V. – 109. – P. 182-200. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.007.
31. Thermal management of power electronics with liquid cooled metal foam heat sink / Y. Li, L. Gong, B. Ding [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2021. – V. 163. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106796.
32. Enhancing the performance of aluminum foam heat sinks through integrated pin fins / Y. Li, L. Gong, M. Xu, Y. Joshi // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 151. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119376.
33. Thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with triangular ribs on sidewalls – Part 1: Local fluid flow and heat transfer characteristics / L. Chai, L. Wang, X. Bai // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 127. – P. 1124-1137. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.114.
34. Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude / L. Lin, J. Zhao, G. Lu [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – V. 118. – P. 423-434. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.013.
35. Design of microchannel heat sink with wavy channel and its time-efficient optimization with combined RSM and FVM methods / J. Zhou, M. Hatami, D. Song, D. Jing // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 103. – P. 715-724. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.100.
36. Laminar flow and heat transfer characteristics of interrupted microchannel heat sink with ribs in the transverse microchambers / L. Chai, G. D. Xia, H. S. Wang // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – V. 110. – P. 1-11. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.029.
37. Thermal-hydraulic performance of interrupted microchannel heat sinks with different rib geometries in transverse microchambers / L. Chai, L. Wang // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – V. 127. – P. 201-212. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.029.
38. Heat transfer enhancement in microchannel heat sink using hybrid technique of ribs and secondary channels / I. A. Ghani, N. A. C. Sidik, R. Mamat [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – V. 114. – P. 640-655. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.103.
39. Parametric study on thermal performance of microchannel heat sinks with internal vertical Y-shaped bifurcations / G. Xie, H. Shen, C.C. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 90. – P. 948-958. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.034.
40. Numerical study of heat transfer and load-bearing performances of corrugated sandwich structure with open-cell metal foam / T. Xiao, L. Lu, W. Peng [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – V. 215. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124517.
41. Implication of corrugation profile on thermo-hydraulic characteristics of Cu-water nanofluid flow through partially filled porous channel / D. Bhowmick, P. R. Randive, S. Pati // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2021. – V. 125. – DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105329.
42. Thermal performance analysis of porous-microchannel heat sinks with different configuration designs / T. C. Hung, Y.X. Huang, W.M. Yan // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – V. 66. – P. 235-243. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.019.
43. Forced convection and heat transfer of water-cooled microchannel heat sinks with various structured metal foams / B. Shen, H. Yan, B. Sunden [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – V. 113. – P. 1043-1053. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.004.
44. Performance of novel liquid-cooled porous heat sink via 3-D laser additive manufacturing / P.H. Tseng, K.T. Tsai, A.L. Chen, C.C. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 137. – P. 558-564. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.116.
45. Metal foams with graded pore size for heat transfer applications / G. Zaragoza, R. Goodall // *Adv. Eng. Mater.* – 2013. – V. 15 (3). – P. 123–128.

46. Experimental study on pool boiling heat transfer in gradient metal foams / Z.G. Xu, C.Y. Zhao // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 85. – P. 824-829. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.017.
47. Modeling and analysis of an efficient porous media for a solar porous absorber with a variable pore structure / P. Wang, K. Vafai // J. Sol. Energy Eng. – 2017. – V. 139 (5).
48. Analysis of the effective thermal conductivity of isotropic and anisotropic Periodic Open Cellular Structures for the intensification of catalytic processes / M. Bracconi, M. Ambrosetti, M. Maestri, [et al.] // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. – 2020. – Volume 158. – DOI 10.1016/j.cep.2020.108169.
49. Heat transfer characteristics investigations on liquid-cooled integrated micro pin-fin chip with gradient distribution arrays and double heating input for intra-chip micro-fluidic cooling / S. Feng, Y. Yan, H. Li [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – V. 159. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120118.
50. Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials / B. Wang, Y. Hong, X. Hou [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2015. – V. 105. – P. 206-215. – DOI 10.1016/j.enconman.2015.07.064.
51. Forced convective heat transfer of tubes sintered with partially-filled gradient metal foams (GMFs) considering local thermal non-equilibrium effect / Z.G. Xu, J. Qin, X. Zhou, H.J. Xu // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 137. – P. 101-111. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.074.
52. Numerical investigation on forced convection of tubes partially filled with composite metal foams under local thermal non-equilibrium condition / Z.G. Xu, Q. Gong // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – V. 133. – P. 1-12. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.014.
53. Performance analysis and multi-objective optimization for tubes partially filled with gradient porous media / C. Shi, M. Wang, J. Yang [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2021. – V. 188. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2020.116530.
54. Optimization of heat transfer enhancement and pumping power of a heat exchanger tube using gradient and multi-layered porous foams / M. Siavashi, H.R.T. Bahrami, E. Aminian // Applied Thermal Engineering. – 2018. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.066.
55. Thermohydraulic analysis of hybrid nanofluid in a multilayered copper foam heat sink employing local thermal non-equilibrium condition: Optimization of layers thickness / M. Ghaneifar, H. Arasteh, R. Mashayekhi [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 181. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2020.115961.
56. Development and numerical investigation of novel gradient-porous heat sinks / B. Wang, Y. Hong, L. Wang [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2015. – V. 106. – P. 1370-1378. – DOI 10.1016/j.enconman.2015.10.071.
57. The effects of variable porosity and cell size on the thermal performance of functionally-graded foams / M. Iasiello, N. Bianco, W.K.S. Chiu, V. Naso // International Journal of Thermal Sciences. – 2021. – V. 160. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106696.
58. Functionally graded porous structures: Analyses, performances, and applications – A Review / D. Chen, K. Gao, J. Yang, L. Zhang // Thin-Walled Structures. – 2023. – V. 191. – DOI 10.1016/j.tws.2023.111046.
59. Structural design and mechanical response of gradient porous Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting / Y.C. Wu, C.N. Kuo, M.Y. Shie [et al.] // Jmade. – 2018. – DOI 10.1016/j.matdes.2018.08.027.
60. Empirical rule for predicting mechanical properties of Ti-6Al-4V bone implants with radial-gradient porosity bionic structures / Y.C. Wu, C.N. Kuo, T.H. Wu [et al.] // Materials Today Communications. – 2021. – V. 27. – DOI 10.1016/j.mtcomm.2021.102346.
61. Forced convection heat transfer in heat sinks with topologies based on triply periodic minimal surfaces / M. Khalil, M. I. H. Ali, K. A. Khan, R. A. Al-Rub // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – V. 38. – DOI 10.1016/j.csite.2022.102313.

Поступила в редакцию 03.02.2025 г., рекомендована к печати 19.02.2025 г.

PROMISING APPROACHES TO INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN COMPACT ENERGY-SATURATED SYSTEMS BASED ON MICROCHANNEL AND POROUS MEDIA

Malevanyi M.V., Kononov D.A., Chernichenko V.V., Solzhenikin P.A., Krylova E.V.

The work is devoted to the review of modern research on the topic of intensification of thermal-hydraulic characteristics in compact heat-exchange devices. As a promising direction, the increase in the efficiency of heat exchangers is considered due to the use of developed surfaces and highly thermally conductive porous materials. Special attention is paid to a promising direction of intensification - the use of heterogeneous and anisotropic porous media.

Keywords: porous medium, developed heat exchange surface, highly porous materials, intensification, anisotropy.

Малеванный Михаил Владимирович

аспирант кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: 89304110859@mail.ru

Malevanyi Mikhail Vladimirovich

Postgraduate student at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Коновалов Дмитрий Альбертович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Российская Федерация, г. Москва,
профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: dmikononov@yandex.ru

Kononov Dmitrii Albertovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering named after M.P. Vukalovich of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow,
Professor of the Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Черниченко Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: vlad1427@yandex.ru

CHernichenko Vladimir Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Солженикин Павел Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: scorpion-050806@yandex.ru

Solzhenikin Pavel Anatolevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Крылова Елена Владимировна

кандидат педагогических наук, доцент кафедры атомных электрических станций ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: ele-krylova@yandex.ru

Krylova Elena Vladimirovna

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Departments of Nuclear Power Plants of the Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СОГЛАСОВАННОЙ РАБОТЫ СМЕЖНЫХ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ САМЫХ ХОЛОДНЫХ ЧАСОВ ГОДА: МИКРО- И МАКРО- УРОВНИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

© 2025 Бирюков А.Б., Гаращенко В.Н.

Проведен анализ часовых режимов генерации и потребления тепловой и электрической энергии. Разработаны дискретные модели оптимизации энерготехнологических систем теплоснабжения зданий, районов и городов для гипотетического частного случая согласованной работы централизованных и децентрализованных систем в ночные часы самой холодной декады отопительного периода при комбинированном использовании тепловой энергии от систем теплоснабжения и тепловой энергии, полученной при трансформации электрической энергии. Актуальность определения рациональных режимов согласованной работы смежных тепло- и электроэнергетических систем на микро- и макро-уровнях теплоснабжения обусловлена имеющимися запасами традиционных источников энергии и высоким уровнем централизации энергоснабжения в Российской Федерации, а также необходимостью сокращения вредных выбросов, в том числе теплового загрязнения окружающей среды, при комбинированном и раздельном производстве тепловой и электрической энергии. Синтезированы единая микро-энергетическая модель 1 и макро-модель 2, которые рассматриваются как системы, использующие и генерирующие тепловую энергию. Генерация тепловой энергии для потребления в макро-модели 2 представлена данными о работе котельных с мощностью до 3 Гкал, от 3 до 20 Гкал и от 20 до 100 Гкал. Разработано определение синергетического эффекта, как совокупности энергетического, экономического и экологического эффектов использования предлагаемых решений. Определены направления использования предложенных решений: снижение энергетических потерь при согласованной работе централизованных и децентрализованных энергетических систем на стадиях эксплуатации, проектирования реконструкции и нового строительства; повышение устойчивости, качества и безопасности теплоснабжения; снижение текущих энергетических расходов; сокращение количества вредных выбросов и теплового загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: согласование работы централизованных и децентрализованных энергетических систем, комбинированное использование возобновляемых и невозобновляемых источников энергии, единая микро-энергетическая модель, единицы условной энергии, сокращение потерь, снижение вредных выбросов и теплового загрязнения.

Введение. В связи с ростом использования возобновляемых источников энергии всё большую значимость приобретает необходимость такого их использования совместно с традиционными источниками, когда эффективность использования невозобновляемых энергоресурсов не снижается, либо растёт. Повышение до максимально возможного уровня энергоэффективности использования невозобновляемых источников энергии при комбинированном их использовании совместно с возобновляемыми при производстве тепловой и электрической энергии связано, в первую очередь, с определением рациональных часовых режимов согласованной работы централизованных и децентрализованных систем.

Большая часть, а именно 65,98% [1] электрической энергии производится с использованием тепловой энергии на тепловых электростанциях (ТЭС) и электроцентралях (ТЭЦ). Комбинированная генерация считается более эффективным способом производства тепловой и электрической энергии, но доля производства только тепловой энергии на котельных по-прежнему высока в Российской Федерации – это 55,76% или 733,7 млн. Гкал тепловой энергии за год [2] из невозобновляемых источников энергии (рис. 1).

Потребители обеспечиваются теплом в течение отопительного периода и горячим водоснабжением круглогодично. Эффективность работы котельных - элемента целостной энергетической системы, зависит как от эффективного преобразования первичной энергии в тепловую на объекте генерации, так и от соответствия количества произведенной тепловой энергией количеству энергии, которая необходима и достаточна для конечного потребления.

Производство тепловой энергии, млн. Гкал

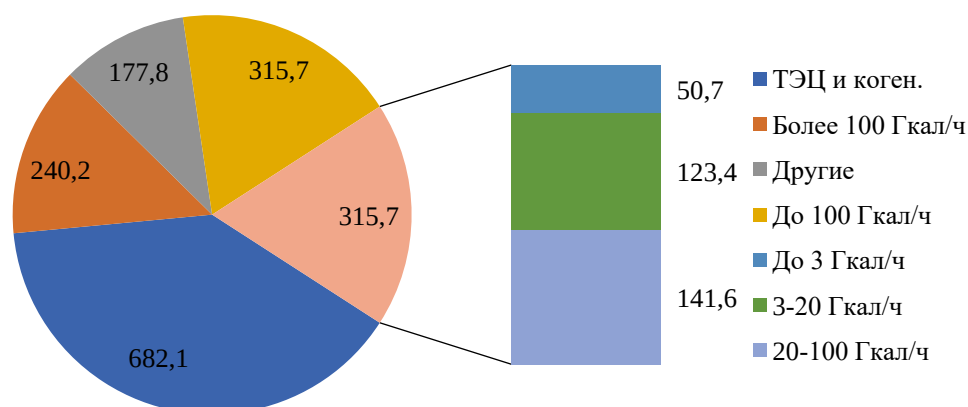


Рис. 1. Структура тепловой генерации России

Соотношение между генерацией и потреблением энергии изменяется в зависимости от времени года, времени суток и других факторов. Это касается как тепловой, так и электрической энергии. При этом необходимо учитывать, что энергогенерирующее оборудование эффективно использует (по критериям максимального значения коэффициента полезного использования топлива и минимального значения количества вредных выбросов и теплового загрязнения) первичную энергию в определенной и достаточно узкой части рабочего диапазона, в том числе для тех случаев, когда фактические вредные выбросы не превышают допустимых нормируемых значений [3]. Общий рабочий диапазон энергогенерирующего оборудования ТЭС и ТЭЦ имеет нижний предел, который определяется износом оборудования и составляет не ниже 65% номинальной мощности [4]. Необходимо отметить также, что, наиболее экологически безопасные газовые ТЭЦ, которые вырабатывают как электрическую, так и тепловую энергию [5] в пиковых режимах, в том числе в ночные часы отопительного периода генерируют максимальное количество электроэнергии. Определение режимов согласованной работы тепловых и электрических энергосистем актуально для оптимизации схем теплоэнергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, в том числе, основанных на принципах их комбинированного производства. Цель представленного исследования - рассмотреть в комплексе режимы генерации и потребления тепловой энергии во взаимосвязи со смежной электроэнергетической системой [6] и разработать рациональные режимы согласованной их работы в частном случае ночных часов самой холодной декады года.

Особенности работы смежных энергосистем в течение суток отопительного периода. Основная потребность в тепловой энергии для отопления обеспечивается работой котельных и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) только в течение отопительного периода. Соотношение между генерацией и потреблением энергии изменяется в зависимости от месяца года, часа суток (рис. 2) и других факторов. Особенностью некоторых промышленных городов, таких как Донецк и промышленных регионов Российской Федерации, таких как Донбасс, является отсутствие в региональной электроэнергетической системе ТЭЦ и тепловая энергия вырабатывается сотнями котельных различной мощности в водогрейном режиме и преимущества использования пара пока не находят применения [7].

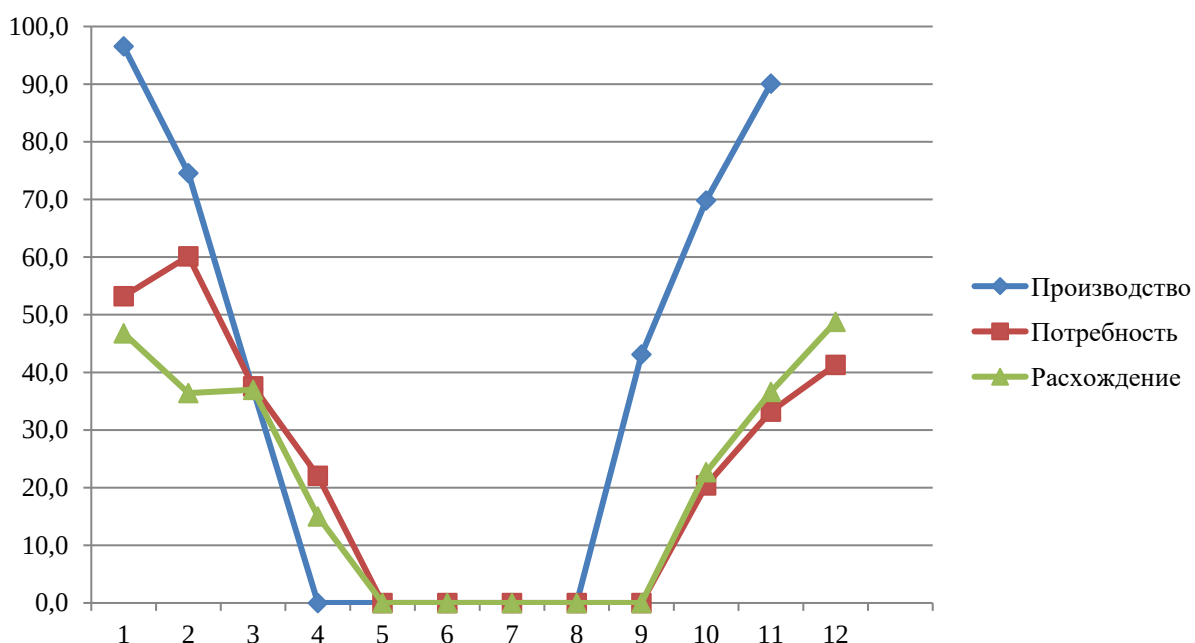


Рис. 2. Изменение часового производства и потребности в тепловой энергии на отопление в процентах по отношению к максимальной генерации в течение 12 месяцев года

В энергоснабжении участвуют и централизованные, и децентрализованные системы. Приведение к соответствию общего количества произведенной и переданной по сетям тепловой и электрической энергии и количества необходимой и достаточной энергии для потребителей путем согласования работы различных энергетических систем необходимо для сокращения расхода первичных энергоресурсов, в том числе на компенсацию потерь, и для снижения количества вредных выбросов в окружающую среду.

Для исследования часовых изменений энергопотребления и оценки комплексной генерации в соотношении с объединенной потребностью в энергии приводятся к сопоставимому виду единицы измерения тепловой и электрической энергии (рис. 3). В тепловой энергетике используются гигакалории и эквивалент 1 Гкал равен 4186,8 МДж, в электроэнергетике используются киловатт-часы и эквивалент 1 кВтч=3,6 МДж. Возможно также использование других эквивалентов единиц энергии.

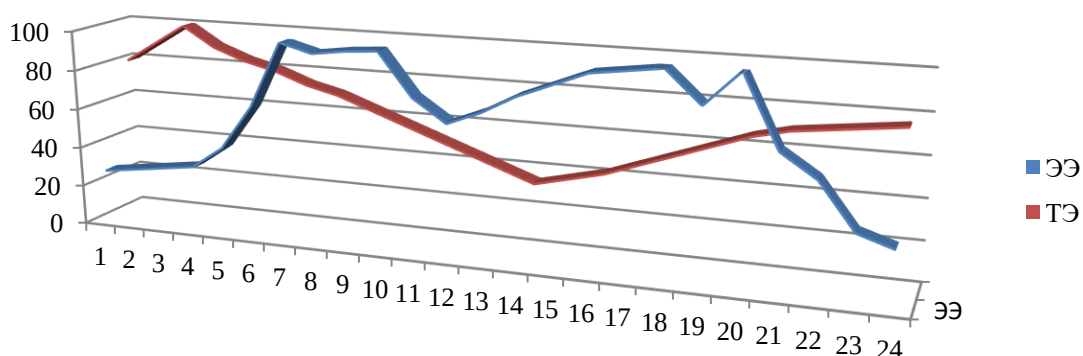


Рис. 3. Изменение потребления тепловой и электрической энергии в процентах по отношению к максимальной генерации в часы самых холодных суток отопительного периода (ЭЭ – электроэнергия, ТЭ – тепловая энергия)

В период суток, когда потребляемая электрическая мощность сопоставима с генерируемой на электростанциях, количество часовых потерь (в высоковольтных линиях электропередач и распределительных сетях) находится в рамках расчетных и нормируемых значений. Но в ночные часы потребляемая электрическая мощность значительно сокращается до минимума, а значительное снижение выработки пара и электроэнергии на работающих блоках тепловых электростанций в это же время труднореализуемо по техническим причинам, в том числе связанным с длительным сроком эксплуатации энергогенерирующего оборудования. В результате приходится останавливать ряд блоков на несколько часов с тем, чтобы в последующем их опять запускать по мере роста потребления электроэнергии. Такие технологические операции сопровождаются повышенными потерями и энергозатратами. Для стимулирования ночного потребления электроэнергии вводится «ночной» тариф, величина которого в несколько раз ниже базового тарифа. По этой причине востребованными являются технические и организационные решения, нацеленные на повышение ночного потребления, выгодные как для производителей, так и для потребителей электрической энергии.

Для систем, в которых потребители подключены к централизованной системе электроснабжения появляется возможность сокращения неоправданных потерь [8] за счет использования вторичной тепло-электрической энергии (тепловой энергии второго порядка) за счет производства тепловой энергии с использованием электрической.

Для частного случая ночных часов самой холодной декады отопительного периода предлагаемое решение заключается в следующем (рис. 4): в ночные часы суток использование тепловой энергии только от водяной системы теплоснабжения с рабочим диапазоном до значения теплопотребления, которое состоит из постоянной $Q_{\text{пост}}$ (для 24-х часов) и переменной $Q_{\text{перем}}$ (для ночных 8-ми часов) составляющих, замещается комбинированным использованием источников тепла и электроэнергии ($Q_{\text{пост}} + W_{\text{перем}}$), при котором тепловая энергия $W_{\text{перем}}$ получена от теплогенерирующего электрооборудования и замещает $Q_{\text{перем}}$. $W_{\text{перем}}$ производится из электроэнергии, которая в ночные часы не востребована и дополнительные расходы первичных энергоносителей не требуются, в тоже время расход топлива на котельных снижается исходя из значения $Q_{\text{перем}}$.

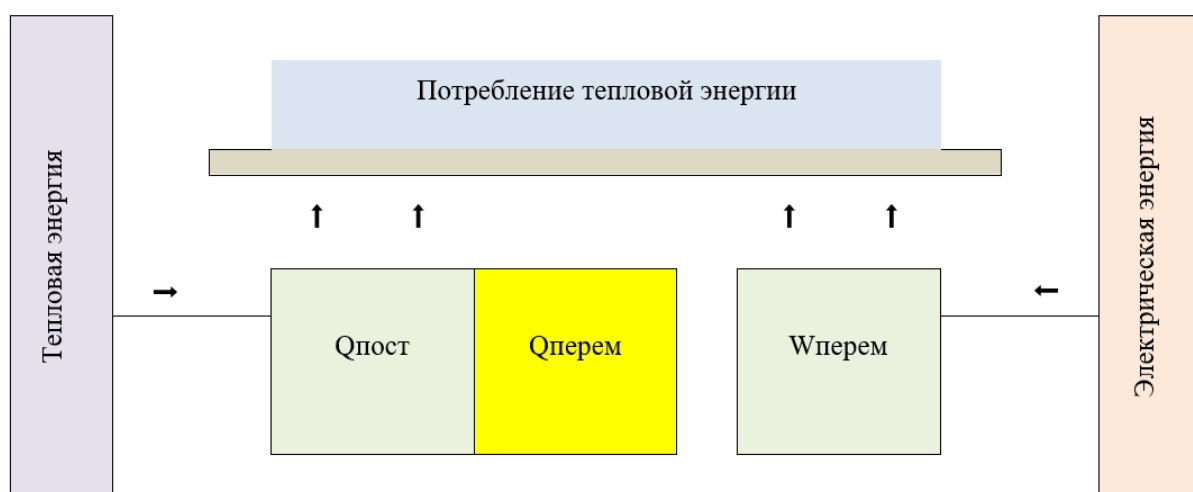


Рис. 4. Комбинированное теплоснабжение от источника тепла и от теплогенерирующего электрооборудования

Диапазоны энергопотребления смежных систем и моделирование рационального решения комплексной генерации. Для определения рациональных изменений режимов работы смежных энергетических используется синтезированная микромодель 1. Такой микро-уровень определяется энергетическими предприятиями, в большинстве случаев, как "лицевой счёт" или "абонент", но для каждой из систем тепло- и электроснабжения раздельно. В синтезированной единой микро-энергетической системе тепловая и электрическая энергии приводятся к сопоставимому виду, что позволяет проводить корректный анализ, а также определять суммарные значения. Изменения потребности в тепловой и электрической энергии на микро-уровне за 24 часа отопительного периода представлены в процентах от максимального значения энергопотребления.

Предлагаемое решение применяется следующим образом: в представленной модели 1 исходный максимум теплоснабжения снижается со значения 100% (в 3 ч 00 мин) до значения 34% (в 14 ч 00 мин). Исходный минимум потребления электрической энергии повышается с 24% (в 01 ч 00 мин) до 100% (в 07 ч 00 мин). Для модели 1 предлагается рациональное решение согласования генерации в централизованной системе теплоснабжения с возможностями децентрализованной системы, в которой централизованная электрическая энергия применяется для производства тепловой (рис. 4 и рис. 5). Это связано с выравниваем как тепловой (за счет снижения пиковой нагрузки ночных часов и в 03 ч 00 мин изменяется со 100% до 50%), так и электрической нагрузки (за счет увеличения минимального потребления в ночные часы и в 03 ч 00 мин изменяется с 28% до 78%).

Применение единой микро-энергетической модели 1 позволяет определять рациональные режимы и соответствующие соотношения между тепловой энергией, которая используется в централизованных системах теплоснабжения от котельных и комбинированной тепловой энергией, которая получена дополнительно и децентрализованно при трансформации электрической энергии в тепловую, рационально используя потери.

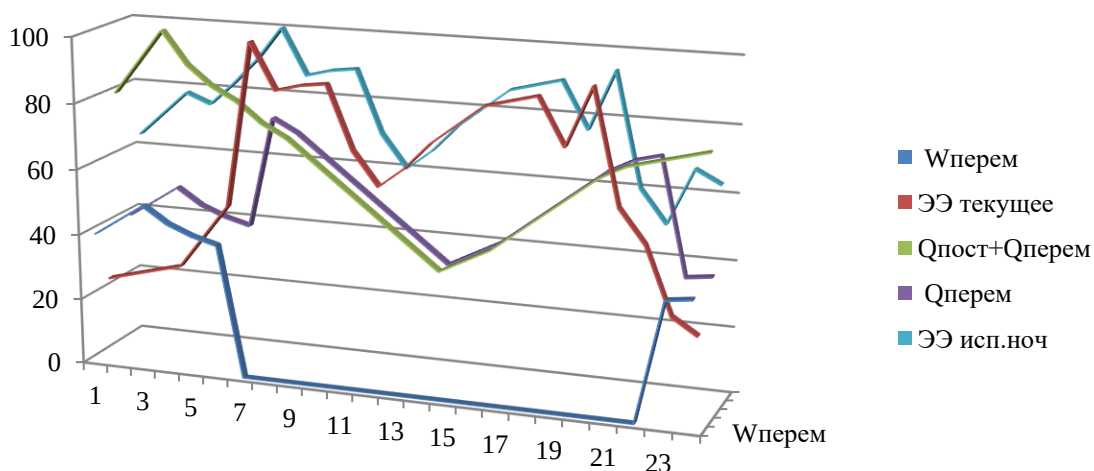


Рис. 5. Использование в ночные часы суток «свободной» электрической энергии для комбинированного производства тепловой и снижения «пиков» генерации тепловой энергии на котельных

Для исследования часовых изменений энергопотребления и оценки комплексной генерации в соотношении с объединенной потребностью в энергии приводятся к сопоставимому виду единицы измерения тепловой и электрической энергии. Наряду с использованием таких эквивалентов гигакалорий и эквивалентов киловатт-часов как мегаджоули, возможно использование и других эквивалентов единиц энергии, а также долевых (процентных) соотношений для таких случаев, как исследования изменений генерации и трансформации различных видов энергии, происходящих в одно и тоже время.

Невостребованная в ночное время электроэнергия может быть использована, как вторичная тепло-электрическая энергия (или тепловая энергии второго порядка). Использование предлагаемого решения особенно актуально для ночных часов отопительного сезона, когда температура наружного воздуха достигает минимальных суточных значений, в том числе в самую холодную декаду) и позволяет снизить потребление тепловой энергии от котельных до необходимых и достаточных значений, а также снизить максимумы давления, температуры и потерь в тепловых сетях, что снижает число аварий, повышает надежность и качество теплоснабжения.

Использование предлагаемых рациональных решений (табл. 1) позволяет определить перераспределение необходимой энергии между исходным теплом только от централизованного источника тепла к комбинированному теплоснабжению, при котором часть тепловой энергии производится с использованием электрической в макромодели 2, таким же образом, что и в микромодели 1. В макромодели в качестве источника централизованной тепловой энергии рассматриваются котельные Российской Федерации с мощностью до 100 Гкал/час и предлагаемые решения рассматриваются гипотетически. В представленных моделях исследуются исходные режимы и их изменения в течение 8 ночных часов самой холодной декады отопительного периода.

Таблица 1. Перераспределение использования тепловой энергии при комбинированном использовании

Час	Период	До перераспределения			После перераспределения		
		ЭЭ	ТЭ	Итого	ЭЭ	ТЭ	ТЭ-ЭЭ
1	0:00-1:00	24,0	80,0	104,0	64,0	40,0	40,0
2	1:00-2:00	26,0	90,0	116,0	71,0	45,0	45,0
3	2:00-3:00	28,0	100,0	128,0	78,0	50,0	50,0
4	3:00-4:00	30,0	90,0	120,0	75,0	45,0	45,0
5	4:00-5:00	40,0	84,0	124,0	82,0	42,0	42,0
6	5:00-6:00	50,0	80,0	130,0	90,0	40,0	40,0
23	22:00-23:00	30,0	74,0	104,0	67,0	37,0	37,0
24	23:00-24:00	25,0	76,0	101,0	63,0	38,0	38,0

Синергетический эффект согласования генерации в смежных энергетических системах. Для демонстрации технико-экономического потенциала предложенного технического решения рассмотрен гипотетический проект, в рамках которого имеется возможность у всех абонентов РФ, подключенных к системе централизованного теплоснабжения, в ночные часы самой холодной декады отопительного периода решить задачу отопления всех объектов за счет получения тепловой энергии как от централизованной системы, так и за счет использования вторичной тепло-электрической энергии.

Эффект применения предлагаемых решений, в первую очередь, связан со снижением максимальной нагрузки на существующее котельное и, планируемое к установке, когенерационное [9, 10] оборудование котельной для использования только тех котлов и КГУ, работа которых обеспечивает показатели, наиболее соответствующие удельным нормам расхода первичного энергоносителя и минимума потерь [11], а также сетей теплоснабжения, с одной стороны, и с использованием части невостребованной электроэнергии, которая произведена в режиме необходимого минимума генерации на тепловых электрических станциях и ТЭЦ, что обеспечивает снижение роста абсолютных потерь в электрических сетях РФ, с другой стороны [12]. Синергетический эффект в измеримых величинах для энергосистемы, в которых тепловая энергия гипотетически производится всеми котельными с мощностью (Гкал/час) до 3, от 3 до 20 и от 20 до 100 можно определить следующим образом (табл. 2):

- энергетический эффект (ТДж), как количество тепловой энергии, на производство которой не были бы затрачены первичные энергоресурсы, используемые котельными (без учета снижения нагрузочных (переменных) потерь в ЛЭП [13,14] и без учета количества тепловой энергии, необходимой на покрытие тепловых потерь в тепловых сетях [15]);

- экологический эффект (тыс.т), как снижение выбросов в атмосферу углекислого газа CO₂ (при 0,36 т/МВтч) [16, 17], другие выбросы в данной модели не рассчитываются.

Таблица 2. Синергетический эффект предлагаемых решений в модели 2

№	Эффект для котельных	Ед.изм.	Часов		
			1	8	80
1	Энергетический всего, в т.ч.:	ТДж	54,840	438,722	4387,217
1.1	- до 3 Гкал/ч	ТДж	8,807	70,457	704,567
1.2	- от 3 до 20 Гкал/ч	ТДж	21,436	171,486	1714,864
1.3	- от 20 до 100 Гкал/ч	ТДж	24,597	196,779	1967,786
2	Снижение выбросов CO ₂ всего, в т.ч.:	тыс.т	5,485	43,883	438,827
2.1	- до 3 Гкал/ч	тыс.т	0,881	7,047	70,474
2.2	- от 3 до 20 Гкал/ч	тыс.т	2,144	17,153	171,528
2.3	- от 20 до 100 Гкал/ч	тыс.т	2,460	19,683	196,825

Таким образом расчетное значение основного показателя синергетического эффекта за 80 ночных часов самой холодной декады отопительного периода для рассматриваемой макромодели 2, а именно энергетический эффект составляет 4387,2 ТДж.

Выводы. Исследованы особенности потребления и генерации тепловой и электрической энергии в ночные часы отопительного периода. Разработаны определения микро- и макро- моделей согласованного тепло- и электропотребления и соответствующей генерации. Определены комплексные рациональные решения перераспределения генерации тепловой энергии за счет использования полученной от трансформации невостребованной ночной энергии через электрическую энергию в тепловую, что позволяет снижать расход первичных энергоресурсов для тепловой генерации на котельных. Предлагаемые решения согласованного использования централизованных и децентрализованных систем потребления и генерации тепловой и электрической энергии для рассмотренного гипотетического случая использования в рамках всей системы централизованного теплоснабжения РФ в течение 80-ти ночных часов самой холодной декады отопительного периода в синтезированной макромодели позволяют для котельных с мощностью до 100 Гкал/ч (которые производят 315,7 млн.Гкал/год) получить энергетический эффект 4387,2 ТДж и экологический эффект снижения выбросов углекислого газа CO₂ в окружающую среду при производстве тепловой энергии на 438,8 тыс.т. Комплексные решения согласования работы тепло- и электроэнергетических систем имеют важное прикладное значение для энергетики и коммунально-бытового сектора. Определены актуальные направления дальнейших исследований: проектирование и новое строительство объектов, рационально интегрированных в существующие тепло- и электроэнергетические инфраструктуры промышленных регионов России; реконструкция существующих объектов и систем. В части интенсификации процессов теплообмена в оборудовании, которое предназначено для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты, направления дальнейших исследований – это разработка критериев и методов расчета согласованного комплексного развития смежных систем тепло- и энергоснабжения для повышения надежности и качества энергоснабжения, оптимизация схем генерации и трансформации энергоносителей с целью снижения энергетических расходов до необходимого и достаточного уровня для комплексного повышения энергоэффективности и защиты окружающей среды в городах и регионах Российской Федерации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Отчет о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2022 году Минэнерго России [Электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения 11.12.2025).
2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году (на основе оперативных данных) [Электронный ресурс]. – URL: <https://so-ups.ru> (дата обращения 11.12.2025).
3. Тайлашева, Т. С. Оценка вредных выбросов от котельных Томской области / Т. С. Тайлашева, Л. Г. Красильникова, Е. С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 52-54.
4. Аминов, Р. З. Эффективность работы парогазовых ТЭЦ при переменных электрических нагрузках с учетом износа оборудования / Р. З. Аминов, М. В. Гариевский // Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 7-8. – С. 10-22.
5. Артамонов, Г. Е. Экологическая оценка по критериям «Зеленых проектов» для объектов тепловой энергетики Российской Федерации / Г. Е. Артамонов, В. А. Гутников, И. И. Васенев // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 1. – С. 74-80.
6. Бирюков, А. Б. Направления повышения энергоэффективности систем генерации тепловой энергии в рамках теплоэнергетики России / А. Б. Бирюков, В. Н. Гаращенко // Энегетические системы. – 2023. – № 2. – С. 17-27.
7. Bungener, S. L. Optimal Operations and Resilient Investments in Steam Networks / S. L. Bungener, G. V. Eetvelde, F. Marechal // Front. Energy Res. Sec. Process and Energy Systems Engineering. – 2016. – V. 4. – DOI 10.3389/fenrg.2016.00001.
8. Карчин, В. В. Снижение потерь электроэнергии путем уменьшения неравномерности электропотребления / В. В. Карчин, Т. В. Мясникова // Вестник Чувашиского университета. Электротехника и энергетика. – 2017. – № 3. – С. 90-98.
9. Yufeng, Y. Intelligent day-ahead optimization scheduling for multi-energy systems Updated / Y. Yufeng, Z. Zhicheng, X. Xubing [et al.] // Frontiers Energy Reseach. Sec. Sustainable Energy Systems. – 2023. – V. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1349194.
10. Выбор схемы утилизации тепла отработавших газов поршневых ДВС и оценка полезного теплоиспользования в составе когенерационной установки / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 1(137). – С. 115-119.
11. Канев, А. А. Современное состояние и перспективы создания когенерационных установок / А. А. Канев, С. В. Кункевич // Вестник молодежной науки. – 2022. – С. 1-6.
12. Методика расчета удельных норм расхода газа на выработку тепловой энергии и расчета потерь в системах теплоснабжения (котельные и тепловые сети) СТО Газпром РД 1.19-126-2004. [Электронный ресурс]. – URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4293841/4293841819.pdf> (дата обращения 11.12.2025).
13. Бакай, Е. О. Экономико-статистический анализ потерь при передаче электроэнергии по высоковольтным проводам в России / Е. О. Бакай // Вестник ЮУрГУ. Экономика и менеджмент. – 2017. – Т. 11. – № 4. – С. 117-125.
14. Геркусов, А. А. Оптимизация потерь электроэнергии, передаваемой по воздушным линиям напряжением 110 кВ и выше / А. А. Геркусов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 1 (214). – С. 89-96.
15. Сопоставительный анализ эффективности производства тепловой и электрической энергии в системах централизованного теплоснабжения / В. П. Берзан, В. М. Постолатий, Е. В. Быкова, В. М. Бабич // Problemele energeticii regionale. Electroenergetica. – 2016. – №3(32). – С. 55-71.
16. Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения МДК4-05.2004. [Электронный ресурс]. – URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4294814/4294814310.pdf>.
17. Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации / П. В. Росляков, Д. О. Скобелев, М. В. Доброхотова, Т. В. Гусева // Уголь. Экология. – 2023. – С. 84-89.

Поступила в редакцию 03.02.2025 г., рекомендована к печати 20.02.2025 г.

DETERMINATION OF RATIONAL MODES OF COORDINATED OPERATION OF ADJACENT HEAT AND ELECTRIC POWER SYSTEMS FOR THE SPECIAL CASE OF THE COLDEST HOURS OF THE YEAR: MICRO- AND MACRO-LEVELS OF ENERGY CONSUMPTION

Biriukov A.B., Garashchenko V.N.

The analysis of hourly modes of generation and consumption of heat and electric energy is carried out. The definition of discrete optimization models of energy-technological heat supply systems of buildings, districts and cities has been developed for the special case of coordinated operation of centralized and decentralized systems during the night hours of the coldest decade of the heating period with the combined use of thermal energy from heat supply systems and thermal energy obtained during the transformation of electrical energy. The relevance of determining rational modes of coordinated operation of adjacent heat and electric power systems at the micro and macro levels of heat supply is due to the available reserves of traditional energy sources and the high level of centralization of energy supply in the Russian Federation, as well as the need to reduce harmful emissions, including thermal pollution of the environment, in the combined and separate production of heat and electric energy. A single micro-energy model 1 and macro-model 2 have been synthesized, which are considered as systems using and generating thermal energy. The generation of thermal energy for consumption in macro-model 2 is represented by data on the operation of boilers with a capacity of up to 3 Gcal, from 3 to 20 Gcal and from 20 to 100 Gcal. The definition of the synergetic effect as a combination of energy, economic and environmental effects of using the proposed solutions has been developed. The directions of using the proposed solutions have been identified: reducing energy losses during the coordinated operation of centralized and decentralized energy systems at the stages of operation, design, reconstruction and new construction; increasing the sustainability, quality and safety of heat supply; reducing current energy costs; reducing harmful emissions and thermal pollution of the environment.

Keywords: coordination of centralized and decentralized energy systems, combined use of renewable and non-renewable energy sources, unified micro-energy model, units of conventional energy, reduction of dams, reduction of harmful emissions and thermal pollution.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гарашченко Валерий Николаевич

младший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: gwel@mail.ru

Garashchenko Valerii Nikolaevich

Junior Researcher of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

EDN VMHVMK
УДК 620.92; 502

DOI 10.5281/zenodo.15056748

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВОДОРОДА ДЛЯ ГОРОДСКОГО АВТОТРАНСПОРТА

© 2025 *Александрова А.А., Сердюк А.И.*

Показано, что получение водорода для городского автотранспорта электролизом воды предназначено для работы только с чистой достаточно дорогой дистиллированной водой с содержанием железа не выше 1 мг/дм³, хлоридов 2 мг/дм³ и сухого остатка 3 мг/дм³. Для этого может потребоваться примерно 25 миллиардов кубометров пресной воды в год, что эквивалентно потреблению воды в стране с населением 62 миллиона человек. Отходом обратноосмотического метода обессоливания воды является концентрат солей. Природной водой, соответствующей требованиям для получения водорода, обладают только воды озера Байкал, содержащие сульфаты и хлориды в малых количествах: в среднем концентрация сульфатов - 5,2 мг/дм³, хлоридов - 0,5 мг/дм³.

Ключевые слова: автотранспорт, экология, водород, очистка воды, обратный осмос, парниковый эффект.

Введение. Городской автотранспорт, работающий на бензине, природном газе и дизельном топливе, является основным загрязнителем атмосферы городов токсичными компонентами выхлопных газов: оксидом углерода, оксидами азота и несгоревшими углеводородами. Нейтрализаторы выхлопных газов автотранспорта превращают эти компоненты в безвредные вещества, такие как углекислый газ, воду и молекулярный азот. Но был и остается в выбросах преобладающий по количеству парниковый углекислый газ. Кроме всего прочего используемое топливо для автотранспорта: является исчерпаемым природным сырьем. Ведутся работы по применению водорода в качестве автомобильного топлива [1-3]. В мире в 2023 году было продано 14,5 тысяч автомобилей, работающих на водороде.

Проблема создания энергосберегающих технологий является одной из главных задач современного техногенного общества. Успехи в развитии водородных технологий продемонстрировали, что использование водорода и водородсодержащих топлив приводит к качественно новым показателям в работе энергетических систем. Преимущество водородной энергетики в том, что водород можно не сжигать, а электрохимически окислять, используя катализатор - платину, то есть непосредственно превращать в электроэнергию, минуя стадию сжигания. В этом случае намного выше КПД двигателя, абсолютно отсутствуют выбросы, нет никаких тепловых загрязнений. Водород также считается хорошим энергетическим топливом. Большинство авиа-, автопроизводителей, а также производителей водных судов сейчас очень активно работают в этом направлении. Британские эксперты прогнозируют взрывной рост продаж автомобилей с водородными двигателями, начиная с 2025 года. По сути, водородный транспорт, это тот же электромобиль, только с другим аккумулятором.

Анализ последних исследований и публикаций. Работа двигателей внутреннего сгорания на водороде имеет ряд преимуществ [1-4]. Емкость водородного аккумулятора в десять раз больше емкости литий - ионного. Баллон с 5 кг водорода заправляется около 3 минут, его хватает до 500 км пробега.

Плюсы водородного двигателя:

- не выбрасывает в атмосферу загрязняющие вещества, в том числе и диоксида углерода;
- имеет высокий уровень КПД, например, у двигателя внутреннего сгорания (ДВС) он составляет около 35%, а у водородного — от 45%;
- пробег на 1 кг водорода в 2,5-3 раза больше, чем на эквивалентном ему по энергоемкости и объему галлона (3,8 л) бензина;
- бесшумная работа двигателя;
- более быстрая заправка — особенно в сравнении с электрокарами;
- сокращение прямой зависимости от углеводородов, запасы которых не бесконечны.

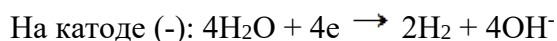
Целью работы является оценка экологических проблем, возникающих при получении водорода с целью его использования в качестве автомобильного топлива.

Основной материал. Рассмотрим минусы, которые имеются у водорода, как топлива для городского автотранспорта. Водород обладает высокой летучестью, проникает даже в небольшие щели и легко воспламеняется. Возникающие при этом пожары являются источником выброса большого количества загрязняющих веществ в атмосферу [4, 5].

Водород имеет очень низкую объемную теплоту сгорания по сравнению с природным газом, бензином и дизельным топливом. Рассмотрим один из самых давно известных распространенных способов производства водорода - электролиз воды [2, 3]. Это метод синтеза водорода, обеспечивает достаточно высокую чистоту конечного продукта. Сопутствующим «бонусом» в этом технологическом процессе становится получение кислорода, не менее важного продукта. На долю электрохимических методов получения водорода приходится примерно 3% получаемого в мире водорода, однако по существующим оценкам, доля водорода, получаемого электрохимическим методом, будет увеличиваться в связи с сокращением запасов природного газа и нефти.

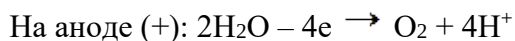
Для изготовления катодов при электролизе воды используется обычная сталь. Катод иногда активируют путем осаждения на его поверхность никеля, содержащего серу или металлов платиновой группы. В качестве анодов при электролизе водных щелочных растворов используют углеродистую сталь, на которую электрохимически наносят никелевое покрытие толщиной 100 мкм. Такой анод сохраняет достаточную коррозионную устойчивость в щелочных растворах даже при наличии $1,5 \cdot 10^3$ пор на 1 м^2 . Малый износ такого анода даже при большей пористости гальванического покрытия объясняется забиванием пор продуктами коррозии стальной основы. Никелирование анода переводит его в пассивное состояние и делает нерастворимым в области потенциалов, при которых происходит выделение кислорода. В качестве электролита для электролиза воды с целью повышения ее электропроводности применяют растворы едкого кали или едкого натра. В электролит также вводят 2 – 3 г/дм³ бихромата калия ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) для подавления коррозии стали. Пригодной для электролизера считается вода с удельной электрической проводимостью не выше 10^{-3} См/м, содержащая не более 10 мг/дм³ хлоридов и до 3 мг/дм³ железа.

В природной воде содержится семь основных ионов: четыре катиона – натрий, калий, магний и кальций и три аниона – гидрокарбонаты, сульфаты и хлориды. Так как катионы натрия, калия и магния относятся к первой группе металлов, то на катоде будет восстанавливаться водород из молекулы воды. На катоде выделяется водород, а в прикатодном пространстве образуются гидроксиды натрия, калия или магния:

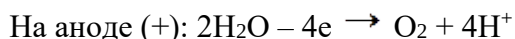


Рассмотрим процессы, протекающие на аноде.

1. Анион - сульфат (SO_4^{2-}). На аноде идут процессы окисления, но сера в сульфатах уже имеет максимальную степень окисления +6 и больше окисляться не может. Следовательно, на аноде будет выделяться кислород из молекулы воды, а в прианодном пространстве образуется серная кислота.

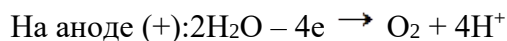


2. Анион - гидрокарбонат (HCO_3^-). На аноде идут процессы окисления, но углерод в гидрокарбонатах уже имеет максимальную степень окисления +4 и больше окисляться не может. Следовательно, на аноде будет выделяться кислород из молекулы воды, а в прианодном пространстве образуется угольная кислота.



Правда может быть побочный эффект, а именно, от проходящего тока раствор может нагреться и тогда гидрокарбонат термически разложится на карбонат, углекислый газ и воду.

3. Анион - хлорид (Cl^-). На аноде идут процессы окисления воды, но хлориды также окисляются с образованием молекулярного хлора (Cl_2). Следовательно, на аноде будет выделяться кислород из молекулы воды и хлор из хлориданиона.



Применение минерализованной воды, содержащей хлориды, в том числе морской, электрический разряд, который генерирует кислород на аноде, превращает ионы хлорида в соленой воде в очень токсичный, высокочернозиронный газообразный хлор (атмосферный воздух ПДК_{мр} = 0,1 мг/м³, ПДК_{сс} = 0,03 мг/м³, класс опасности – 2).

Для электролиза воды, содержащей ионы хлора, используют электроды из драгоценных металлов. Так, например, при электролизе водного раствора хлорида натрия используется оксидно-рутеновый анод (рутений – платиновый металл, цена которого составляет 20% стоимости золота), так как электроды из углеродистой стали с никелевым покрытием очень быстро разрушаются. Кроме того, необходима очистка водорода от примесей хлора и разработка мероприятий по уменьшению загрязнения хлором окружающей среды.

Однако, для питания промышленных электролизеров рекомендуется применять более чистую воду; проводимость не выше 10^{-4} См/м, с содержанием железа не выше 1 мг/дм³, хлоридов - 2 мг/дм³ и сухого остатка - 3 мг/дм³ [2, 3]. Таким требованиям приблизительно соответствует дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144—2018 [6]. Суммарное содержание хлоридов в ней не превышает 0,5 мг/л, железа не выше 0,05 мг/дм³, сухого остатка - 3,2 мг/дм³, а удельная электрическая проводимость при 20°C не выше $4,3 \cdot 10^{-4}$ См/м. Такая вода производится по технологии, основой которой является двухступенчатый обратный осмос - 100% дистиллят. Стоимость этой воды составляет не менее 60 руб/дм³ (60 тыс.руб/м³). Но побочным продуктом ее получения (отходом) является концентрат солей, который частично обезвоживают упариванием и затем захороняют или же сбрасывают в природные водоемы. Максимальное солесодержание концентрата при этом не может превышать 50 - 140 г/дм³ [7]. Поэтому применение обратного осмоса для опреснения-концентрирования шахтных вод, которые имеются в больших количествах в ДНР, с концентрацией выше 10 - 15 г/дм³ экономически нецелесообразно [7].

Содержание хлоридов в природной воде зависит от сезонности и уровня минерализации воды. Например, в водоемах северной части России норма хлоридов в воде не выше 10 мг/дм³, а для южных регионов характерно значение от 10 до 100 мг/дм³. Происхождение хлоридов в воде обусловлено природными источниками. Данные соединения есть практически в каждом природном источнике воды - реках, озерах, скважинах, ручьях, колодцах. Содержание хлоридов в озерах и реках колеблется от доли грамма до нескольких граммов на литр, в морях количество хлорид-ионов составляют 87% от массы всех анионов, поэтому уровень их концентрации в морях и подземных водах позволяет отнести их к перенасыщенным растворам и рассолам. Средняя концентрация хлорид-иона в мировом океане - 19 г/дм³ (19000 мг/дм³).

Существуют 4 основных метода удаления хлоридов из воды, однако, в силу химико-физических свойств эффективность данных методов разная. В промышленных и домашних условиях снижение повышенного содержания хлоридов в воде проводят следующими способами [7]:

- 1) очистка хлоридов в воде с помощью сорбции;
- 2) ионные фильтры для воды от хлоридов;
- 3) озонирование;
- 4) обратный осмос для очистки воды от хлоридов.

Сорбция - первый метод удаления хлоридов из воды. Но сильно растворимые и самые распространенные хлориды в воде, такие как хлориды натрия, магния и кальция, обладают низкой склонностью к сорбции, поэтому данным способом можно очистить воду лишь от труднорастворимых веществ: хлорида серебра, хлорида меди, хлорида свинца и хлорида ртути. Суть данного способа очистки воды от хлорид-ионов состоит в том, что поступающие вместе с жидкостью вещества задерживаются на фильтрующей поверхности сорбционных фильтров с повышенной поглощающей способностью. Данный метод очистки воды от хлоридов можно использовать в бытовых целях в совокупности с иными методами водоподготовки.

Второй способ – ионный обмен. Ионообменные фильтры для очистки от хлоридов в воде используются в промышленности и для частных домов. Сущность метода снижения хлоридов в воде состоит в том, что специальная смола при контакте с водой поглощает отрицательно заряженные ионы всех солей. На выходе образуются ионы металлов: натрия, кальция, магния. Процесс помогает снизить жесткость воды.

Третий способ – озонирование. Озон - это сильный окислитель, под его влиянием хлориды превращаются в нерастворенные вещества, которые удаляются из воды путем механической фильтрации. Вдобавок при такой обработке происходит дезинфекция воды. Для осуществления процесса необходимы специальные системы для очистки воды от хлорида натрия. Как правило, озонаторы используются в промышленности и на водоочистительных станциях ввиду высокой стоимости, а также опасности чистого озона для жизни человека, в быту такие устройства не используются. Промышленная очистка воды от хлоридов с помощью озона уходит в прошлое. На смену приходят методы очистки хлоридов в воде с помощью обратного осмоса.

Однако, очень часто при превышении концентрации хлоридов увеличивается также минерализация воды. В этом случае, для очистки воды от минерализации, в том числе и от хлоридов, эффективным является только метод обратного осмоса. Очистка воды от хлоридов и других солей обратным осмосом заключается в наличии полупроницаемой мембраны, которая беспрепятственно пропускает молекулы воды, при этом удерживая молекулы растворенных веществ.

Для этого необходимо, чтобы примеси (концентрат) постоянно отводились от поверхности мембраны в канализацию, иначе не удастся обеспечить нужное осмотическое давление. Этот процесс происходит под действием сил обратного осмоса. Обратный осмос – наиболее эффективное и выгодное решение, если в воде много хлоридов. Но одноступенчатым обратным осмосом с точки зрения экономики получают только питьевую воду с содержанием не ниже 1000 мг/дм³. Побочным отходом является концентрат солей, который вредит окружающей среде.

Переход на водород позволит уменьшить количество выбросов углекислого газа, что необходимо для борьбы с глобальным потеплением климата. Однако для этого водород должен производиться экологически чистыми способами. В настоящее время существует три основных способа производства водорода: зеленый, синий и серый [3].

Зеленый способ подразумевает электролиз воды — источник питания постоянного тока подключается к двум электродам, которые находятся в воде. В результате на катоде образуется водород, а на аноде — кислород.

Синий водород получают путем паровой конверсии метана из природного газа. При таком производстве в атмосферу выбрасывается даже большее количество углекислого газа, чем при сжигании природного газа.

Серый же водород считается самым грязным источником водородного топлива, так как для его производства используются все остальные ископаемые виды топлива.

Синий и серый методы дают 95 % синтезированного в мире водорода, который перед использованием в качестве топлива очищают от примесей, отравляющих катализатор. В качестве побочного продукта выделяется диоксид углерода, в количестве большем, чем при прямом сжигании природного газа и каменного угля. Кроме того, водород в этом случае является невозобновляемым источником энергии.

Еще одним из менее распространенных методов получения водорода – биохимическое разложение или пиролиз органики [3]. Иными словами – разложение органики при помощи бактерий или термической обработки.

Исходным сырьем для этого могут служить отходы сельского хозяйства и пищевых производств:

1. Птичий помёт и другие побочные продукты животноводства.
2. Отходы рыбных, соко- и мясокомбинатов.
3. Некоторые виды технических культур, специально выращенных для получения биомассы.

При переработке всех этих биоматериалов при помощи специальных бактерий образуется синтез-газ, в основном, состоящий из метана и углекислого газа. Продуктом переработки метана является водород и углекислый газ. Получение водорода таким путем относится к возобновляемым источникам энергии, но доля его невелика.

Отсюда следует, что единственным оптимальным решением для борьбы с глобальным потеплением климата является производство зеленого водорода. Однако он стоит около 5 долларов США за 1 кг, что в два раза дороже, чем серый водород. Поэтому в настоящее время ученые работают над способами удешевления зеленого водорода хотя бы до 1 доллара за 1 кг. Но его высокая стоимость является не единственной проблемой.

Таким образом, электролизеры для получения водорода предназначены для работы только с чистой достаточно дорогой дистиллированной водой. Увеличение объемов производства зеленого водорода может усугубить глобальную нехватку пресной воды. Для получения 1 кг водорода с помощью электролиза требуется около 9 - 10 кг дистиллированной воды.

По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, для работы грузовиков и ключевых отраслей промышленности на зеленом водороде может потребоваться примерно 25 миллиардов кубометров пресной воды в год, что эквивалентно потреблению воды в стране с населением 62 миллиона человек. Отходом обратноосмотического метода обессоливания воды является концентрат солей. Природной водой, требуемой для получения водорода, обладают только коренные воды озера Байкал, содержащих сульфаты и хлориды в малых количествах: в среднем концентрация сульфатов - 5,2 мг/дм³, хлоридов - 0,5 мг/дм³. Содержание гидрокарбонатов в водах Байкала в разные годы находится в пределах 64-72 мг/дм³. Но они практически не мешают процессу электролиза воды для получения водорода [8].

Кроме того, следует учитывать, что в настоящее время отсутствуют трубопроводы и распределительные системы для транспортирования водорода, что делает невозможным быстрый переход на водород, как основной источник энергии.

Стоит также отметить, что возможно в будущем вообще не придется синтезировать водород. По мнению некоторых ученых, большие запасы водорода имеются в недрах Земли, в том числе и в ДНР. Более того, уже даже существуют скважины, из которых его добывают. Это дешевый и экологичный способ получения топлива, но это уже будет невозобновляемый источник энергии.

Выводы. Таким образом, применение водорода в качестве автомобильного топлива в настоящее время улучшит экологическую ситуацию в местах использования автотранспорта, но ухудшит в местах получения водорода любым из трех известных методов: электролизом воды, из природного газа и из каменного угля. Сюда можно отнести образование большого количества отходов при дистилляции воды – концентрата солей, а также сохранение на прежнем уровне выбросов углекислого газа при получении водорода из природного газа и других горючих ископаемых.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белобородов, С. С. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества: монография / С. С., Белобородов, Е. Г. Гашо, А. В. Ненашев. – Санкт-Петербург: Научное издательство, 2021. – 151 с. – ISBN 978-5-6047314-3-7.
2. Козлов, С. И. Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / С. И. Козлов, В. Н. Фатеев ; под ред. Е. П. Велихова. – 2-е изд. – Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2022. – 504 с. – ISBN 978-5-89754-105-8.
3. Романов, А. С. Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода / А. С. Романов // Научные записки молодых исследователей. – 2023. – Т. 11, № 3. – С.73–80.
4. Александрова, А. А. Проблемы экологической безопасности водородной энергетика для автотранспорта / А. А. Александрова, А. И. Сердюк // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2023. – №1 (67). – С.9-13.
5. Александрова, А. А. Проблемы пожарной безопасности при использовании водорода в качестве автомобильного топлива / А. А. Александрова, А. И. Сердюк // Научный журнал. Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2022. – Вып. 2(12). – С.27-31.
6. ГОСТ Р 58144-2018 Вода дистиллированная. Технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 мая 2018 г. № 280-ст: введен впервые: дата введения 2021-07-01 / разработан ЗАО «ЦИКВ». – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – 12 с.
7. Резников, Ю. Н. Шахтные и карьерные воды. Концентрирование, использование, обессоливание и комплексная переработка: монография / Ю. Н. Резников, В. Г. Львов, В. В. Кульченко. – Донецк: Каштан, 2003. – 242 с. – ISBN 966-8292-24-3.
8. Шпейзер, Г. М. Гидрохимическая характеристика озера Байкал / Г. М. Шпейзер, Н. А. Селина, Е. И. Иванова // Журнал Современные наукоемкие технологии. Раздел «Экология и рациональное природопользование». – 2007. – № 8 – С. 99-100.

Поступила в редакцию 05.12.2024 г., рекомендована к печати 09.01.2025 г.

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN OBTAINING HYDROGEN FOR URBAN VEHICLES

Aleksandrova A.A., Serdiuk A.I.

It has been shown that the production of hydrogen for urban vehicles by electrolysis of water is designed to work only with clean, rather expensive distilled water with an iron content of no more than 1 mg/dm³, chlorides of 2 mg/dm³ and a dry residue of 3 mg/dm³. This may require approximately 25 billion cubic meters of fresh water per year, which is equivalent to the water consumption in a country with a population of 62 million people. The salt concentrate is a waste of the reverse osmotic method of desalination of water. Only the waters of Lake Baikal containing sulfates and chlorides in small quantities have natural water that meets the requirements for hydrogen production: on average, the concentration of sulfates is 5.2 mg/dm³, and chlorides is 0.5 mg/dm³.

Keywords: motor transport, ecology, hydrogen, water purification, reverse osmosis, greenhouse effect.

Александрова Александра Александровна

магистрант факультета инженерных и экологических систем в строительстве ФГБОУ ВО «ДОННАСА».

Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка

E-mail: aleksandrova.a.a-izos-4@donnasa.ru

Aleksandrova Aleksandra Aleksandrovna

Master student at Faculty of Engineering and Environmental Systems in Construction of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

Russian Federation, DPR, Makeevka

Сердюк Александр Иванович

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «ДОННАСА»,

Российская Федерация, ДНР, г. Макеевка

E-mail: ecoalserdiuk@rambler.ru

Serdiuk Aleksandr Ivanovich

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at Technosphere Safety Department of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

Russian Federation, DPR, Makeevka

**ИЗУЧЕНИЕ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОДНИКОВ
НА ПЛОЩАДЯХ ГИСАРСКИХ ХРЕБТОВ****© 2025 Хуррамов М.Г., Назиров З.Ш., Хуррамова Д.М., Джураева Н.Б.**

В данной работе проведено обследование радиохимических показателей безопасности родников на площадях Гисарских хребтов, используемых населением в питьевых целях. На основании анализа воды определены уровень содержания сульфиды 62,0-65,0 мг/дм³ и удельная активность радионуклида ⁴⁰K-1,6·10⁻¹¹ кюри/л. Высокое содержание изотопа ⁴⁰K связано с его содержанием в кристаллах сильвина и сильвинита в водовмещающих породах, которые являются огромным скоплением в этих площадях. Концентрация определяемых естественных радионуклидов приводит к сильному загрязнению и изменению состава вод родников, которые являются одним из источников воздействия ионизирующего излучения на население, использующее ее для питьевых целей. Полученные результаты могут учитываться для контроля родников, используемых для добычи питьевой воды.

Ключевые слова: родники, естественные радионуклиды, радиохимические показатели, сульфиды, изотопы железа, калийная соль, сильвиниты, калий-40, радон-220.

Введение. В настоящее время обеспечение населения качественной питьевой водой является одной из ключевых проблем в современном мире. Оценка качества водных объектов, а также факторов, влияющих на эти процессы, являются важными и актуальными задачами, поскольку они оказывают влияние на здоровье людей. Все подземные воды являются радиоактивными в той или иной мере, однако радиоактивными принято называть только те воды, которые содержат радиоактивные элементы в измеримом количестве.

К типичным радиоактивным загрязнителям естественного происхождения относятся дочерние радионуклиды природных радиоактивных рядов урана и тория, в первую очередь изотоп ²²²Rn, обладающий высокой миграционной способностью и относительно большим периодом полураспада. Естественные радиоактивные вещества в воде содержатся в виде солей ⁴⁰K, урана, радия, тория, радона и др. Следует отметить, что многие радиоактивные изотопы, способны накапливаться пресноводными животными обитающих в воде [1-5].

В площадях Гисарских хребтов существенная часть жителей использует альтернативные источники питьевой воды, например, самостоятельно отбираемая вода подземных горизонтов из скважин и родников. Вопреки на распространенному мнению о чистоте подземной воды, такая вода зачастую является носителем как химических, так и радиоактивных загрязнителей. Маловодные родники в этих районах с теплым засушливым климатом могут быть значительно обогащены радиоактивными элементами за счет сильного испарения воды, где их концентрация может превысить допустимую для вод.

В настоящее время значительно менее изучено распределение радиоактивных загрязнителей естественного происхождения в родниках площадях Гисарских хребтов и требует установления гидрогеологических условий их формирования.

Постановка задачи. Целью данной работы является изучение радиохимических показателей безопасности родников на площадях Гисарских хребтов, используемых населением в питьевых целях и условий их формирования.

Экспериментальные методы. В работе использовались стандартные методы: физико-химические, титриметрические, спектроскопические, масс-спектрометрические, альфа-спектрометрические и фотометрические методы анализов питьевой воды. Измерения проводились в соответствии с нормативно-технической документацией [5-12].

Результаты и их обсуждение. Результаты наблюдения за площадью расположения обследуемого родника показывают, что из-за сильной деформации или разрывов тектонических плит по горизонтали в этих зонах образовались трещины и каверны в гранитах в верхней оболочке земли, затвердевшие складчатые породы отдельных участков хребтов горы свидетельствуют об этом (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид затвердевших складчатых пород схребтов горы

Анализ фактического состояния родника показывает, что из трех трещин протекают безнапорные отложения с низкой производительностью 0,01-0,02 л/с. Диаметр каверна родника составляет 30 см, средняя температура 24°C-26,5°C, водородный показатель pH=5,3-6,1 (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид исследуемого родника горы: 1-3-трещины родника

Результаты исследования химического состава родника показывают, что практически во всех пробах присутствует естественные сульфиды железа. Родниковые воды наиболее обогащены сульфидом в количестве 62,0-65,0 мг/дм³.

Установленные значения ПДК сульфидов для конкретных видов водопользования 0,03 мг/дм³, которые по классификации относятся к 3-классу опасности [3, 6, 10].

Насыщенный коррозионный цвет свидетельствует о том, что из первой трещины родника протекают воды превышающие уровень вмешательства естественных железных соединений.

Качественный анализ по сухим остаткам химического состава воды из второй трещины родника показывает, что содержатся следующие нерастворимые сульфиды: Fe_2S , Fe_2S_3 , Gr_2S_3 , FeS_2 и Cu_2S . Черно-зеленоватый цвет металлического оттенка затвердевших остатков сульфидов это подтверждает (рис. 3).



Рис. 3. Образец затвердевших остатков сульфидов в трещине на дне родника

В третьей трещины родника также протекают сульфидные воды, синий оттенок от действия солнечной радиации это подтверждает.

Результаты анализов химического состава родника показывают, что воды содержит следующие растворенные катионы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Na^+ , K^+ , Gr^{3+} и анионы: NO_2^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^{3-} , CO_3^{2-} . В составе растворенных кислорода нет, определены растворенные газы: CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2S .

Авторами [5, 10, 11] выявлено, что естественные сульфиды железа содержат следующие устойчивые активные изотопы железа ^{54}Fe (5,9%); ^{56}Fe (91,7%); ^{57}Fe (2,1%); ^{58}Fe (0,3%). Природные радионуклиды этих изотопов по показателям активности α -излучения очень опасно в составе питьевых вод, люди могут получить 0,1 Бк/л - объемная радиоактивная доза.

Результаты изучения характеристик горных пород в месте расположения родника показывают, что фильтровальный коэффициент водопроницаемости $K_f=0,5\text{м}^3/\text{сутки}$, плотность 1800-2000 $\text{кг}/\text{м}^3$, пористость 37-50% (рис. 4). В составе обнаружены сульфиды пирита (FeS_2). Поэтому объем воды родника очень мал.



Рис. 4. Образец горной породы родника

Площадь Гисарских хребтов, где расположены подземные воды родников, содержат запасы минералов устойчивого калий сильвина KCl и натрий сильвинита $(\text{K}, \text{Na}) \text{Cl}$, огромное скопление которых подтверждается действующим заводом по выпуске калиевых минеральных удобрений в Дехконободском районе (рис. 5).



Рис. 5. Образец кристаллов сильвина

Экспериментальный образец был проанализирован по основным радиохимическим показателям. Определена радиоактивность изотопа ^{40}K образца по эталону KCl, которая составляла $1,6 \cdot 10^{-11}$ кюри/л.

Далее проводились исследования поверхностных вод родников в площадях южных Гисарских хребтов, где зафиксировано превышение уровня вмешательства по элементам натрия 240 мг/дм^3 . Повышенная радиоактивность поверхностных вод, где расположены родники может быть объяснена содержанием радиоактивных изотопов ^{40}K и ^{24}Na в водовмещающих породах, что объясняется прямой пропорциональностью между радиоактивностью пород и вод, и зависит от длительности их контакта с водой в процессе выхода.

Радиоактивные воды являются одним из наиболее своеобразных и сложных типов подземных вод, согласно многочисленных данных специалистов в этой области подземные воды содержит очень опасный тяжёлый растворенный газ изотопов радона ^{220}Rn в пределах 1 Бк/л-5 МБк/л, не имеющий цвета и запаха.

Выводы. По результатам исследования можно сделать вывод, что воды родников из трещиноватых гранитов имеют более высокую радиоактивность. Естественная зараженность родников на прямую связана с водовмещающими породами радиоактивных изотопов: железа, калия, натрия, радона и других, которые попадают в воду в результате активного взаимодействия в протекающих трещинах. Высокое содержание менее изученных в воде радионуклидов ^{40}K связано в первую очередь с его содержанием в кристаллах сильвина и сильвинита в водовмещающих породах, которые скоплены в этих площадях. Наибольшую долю в общую оценку степени радиохимической загрязненности изученного родника вносят соединения железа, на которые нужно обратить особое внимание при разработке мероприятий. Полученные результаты могут учитываться для контроля родников, используемых для приготовления питьевой воды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев, А. И. Экспериментальные исследования содержания радона в воде из подземного источника / А.И. Андреев, В. В. Чекунаев // Вестник ТОГУ. – 2012. – Т. 26. – №3. – С. 123-130.
2. Гигиенические требования по ограничению облучения населения, за счет природных источников ионизирующего излучения (СанПиН 2.6.1.2800-10). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 40 с.
3. ГОСТ Р 54316-2011. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
4. Гудзенко, В. В. Изотопы радия и радон в природных водах / В. В. Гудзенко, В.Т. Дубинчук. – М.: Наука, 1987. – С. 20-21.

5. Храменков, С. В. Оценка качества воды родников. Водоснабжение и сантехника / С. В. Храменков, Ю. П. Матвеев. – 1997. – № 3. – С. 5-7.
6. ГОСТ Р 57216-2016 Радиационный контроль. Представление результатов измерений. – М.: Стандартинформ, 1989. – 16 с.
7. Жуковский, В. М. Методы радиационного контроля окружающей среды: учеб. пособие / В. М. Жуковский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. – 2008. – 278 с.
8. Корюгин, П. Ф. Определение петрофизических характеристик по образцам. Часть 2: метод. указания / П. Ф. Корюгин, Л. П. Шилов. – Ухта: УГТУ, 2003. – 38 с.
9. Методика разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты (ДС-2010). – М.: Проект, 2010.
10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
11. Подготовка проб природных вод для измерения суммарной альфа- и бета-активности. Методические рекомендации. – М.: ВИМС, 1997 г.
12. Архангельский, В. И. Радиационная гигиена. Практикум. Учебное пособие/ В. И. Архангельский, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. – 103 с.

Поступила в редакцию 10.01.2025 г., рекомендована к печати 14.01.2025 г

STUDYING THE HYGIENIC ASSESSMENT OF THE CONTENT OF UNDERGROUND SPRINGS IN THE AREAS OF THE GISAR RANGE

KHurramov M.G., Nazirov Z.SH., KHurramova D.M., Dzhuraeva N.B.

The article presents the results of experimental studies to predict the water indicators of springs in the areas of the Gissar ranges used by the population for various purposes. Based on the analysis, the sulfide content in water was determined to be in the range of 62.0-65.0 mg/l and the specific activity was ^{40}K -1.6·10⁻¹¹ curie/l. The results obtained can be used in hygienic monitoring of deep groundwater.

Keywords: springs, water content, sulfides, potassium salt, sylvinites, radioactive isotopes.

Хуррамов Мухтор Гулович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.
E-mail: khurramov58@mail.ru

KHurramov Mukhtor Gulovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

Назирова Зулхайнар Шарипович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.
E-mail: nazirovzsh@mail.ru

Nazirov Zulkainar SHarapovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

Хуррамова Дилобар Мухторовна

ассистент кафедры экологии Международного инновационного университета, Узбекистан, г. Карши.
E-mail: dilobar-xurramova@mail.ru

KHurramova Dilobar Mukhtorovna

Assistant at Department of Ecology of the International Innovation University, Uzbekistan, Karshi.

Джураева Нигина Баходировна

студент Шахрисабзского государственного педагогического института, Узбекистан, г. Шахрисабз.
E-mail: doniyordjuraev290@gmail.com

Dzhuraeva Nigina Bakhodirovna

Student of Shakhrisabz State Pedagogical Institute, Uzbekistan, Shakhrisabz.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **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:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *фамилия(и) и инициалы автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзачным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «Поступила в редакцию хх.хх.20хх г., рекомендована к печати хх.хх.20хх г.» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *фамилия(и) и инициалы автора(ов)*, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
- **Фамилия, имя, отчество;**
- ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
- страна, город;
- адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 681.5:621.37

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСНИ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2025 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе фотонного эхо-эффекта. Показано, что комбинирование оптических и радиотехнических ...

Ключевые слова: обработка радиосигналов, оптические методы, АСНИ, радиообстановка.

Введение. Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

Механизм формирования сигналов. Несмотря на принципиальное [4] ...

Выводы. Таким образом, не смотря на сложность протекающих процессов ...

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
2. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PHCERN.
3. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс] / Studbooks : [Сайт]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 25.01.2025).

Поступила в редакцию xx.xx.2025 г., рекомендована к печати xx.xx.2025 г.

APPLICATION OF OPTICAL INFORMATION PROCESSING METHODS IN ASRS OF SIGNALS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

This paper describes the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the photonic echo effect. It is shown that the combination of optical and radio engineering ...

Keywords: radio signal processing, optical methods, ASRS, radio substitution.

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor Aleksandrovich

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

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиопизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

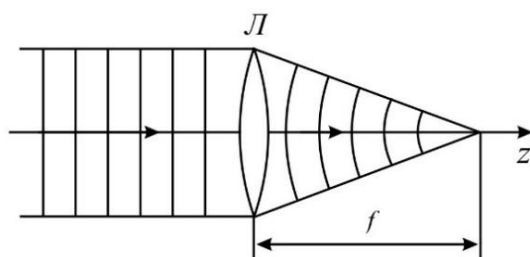


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F_3

Элемент	Номинал	Единица измерения
C_{out}	25	пФ
C_1	10	нФ
C_2	100	мкФ
L_1	150	мкГн
L_2	460	нГн
L_3	765	нГн
R_1	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

Контактный тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2025. – № 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.

Тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

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

Подписано в печать 28.02.2025 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 24,76.

Тираж 100 экз.

Бесплатно.

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.

Тел.: +7 (856) 302 92 27.