

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

**Journal of Siberian
Federal University
Engineering & Technologies**

2025 18 (4)

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

2025 18(4)

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (CША), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: В.А. Кулагин. Редактор А.В. Прохоренко.
Корректор Т.Е. Бастрыгина. Компьютерная верстка Е.В. Гревцовой

№ 4. 25.06.2025. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства:
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 24, ауд. 117.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 20.06.2025. Формат 60х90/8. Усл. печ. л. 10,8.
Уч.-изд. л. 10,3. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 23369.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Vladimir Kulagin, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, member of the expert council of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on energy, electrification and power mechanical engineering, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-5433-7579

EDITORIAL BOARD

- Sergey Alekseenko, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Sereeter Batmönkh, Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;
- Eugene Garin, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Alexander Zavorin, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0001-5724-0150;
- Vladimir Zuev, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0002-1271-1200;
- Sergey Ivanov, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Transbaikal State University, Chita, Russia;
- Yuriy Koziratzky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Military Education and Research Centre of Military-Air Forces «Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Phys.-Math., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
- Tatiana Kulagina, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Expert of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-6165-6474;
- Feng-Chen Li, Prof. Dr. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China; ORCID 0000-0003-2580-928X;
- Dmitriy Markovich, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia; ORCID 0000-0002-1348-1806;
- Andrey Minakov, Dr. Phys.-Math., Prof., Siberian Federal University, Institute of Thermophysics of RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-1956-5506;
- Valery Mironov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7877-9817;
- Vladimir Moskvichev, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7072-2250;
- Bernard Nacke, Dr. of Tech., Prof., Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Honored Engineer of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Oleg Ostrovski, Dr. of Tech., Prof., University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Dr. of Tech., Prof., Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway;
- Vasili Pantelev, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Scopus ID: 57205124847;
- Petr Polyakov, Honored Metallurgist of the RSFSR, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Miloš Stanković, Prof. Dr., Institute of Applied Sciences, Beograd, Srbija; ORCID 0000-0001-9767-5634;
- Valery Stennikov, Academician of RAS, Dr. of Tech., Prof., Melentiev Energy Systems Institute RAS, Siberian Branch, Irkutsk, Russia, ORCID 0000-0001-6219-0354;
- Viktor Tsibulsky, Dr. Tech., Ch. Scientific Co-worker, National Research Center «Kurchatov Institute», Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia, ORCID 0000-0002-7739-9393;
- Ibragim Khisameev, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Dr. of Tech., Prof., Kazan State Technological University, Kazan, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Corresponding member RAS, Dr. of Tech., Prof., Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Computational Modelling Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-7883-5804
- Anatoly Shvidenko, Doctor of Agricultural Science, Prof., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

Evgeniy N. Vasil'ev

Measurement of Heat Fluxes in a Laboratory Model of a Thermoelectric Refrigerator..... 440

Igor V. Naumov, Marina N. Polkovskaya,

Marina A. Yakupova, Elvira S. Fedorinova

Analytical Assessment of Power Transmission Through the Networks of the PJSC "ROSSETI
Volga – Mordovenergo" Branch with the Possibility of Creating Predictive Failure Models 452

Andrey V. Kryukov, Konstantin V. Suslov, Andrey G. Batuhin,

Aleksandr V. Cherepanov, Aleksandr E. Kryukov and Nguen K. Hieu

Application of Renewable Energy Sources in Railway Power Supply Systems of Direct Current 472

Mukhammad-Sultanxan S. Payzullakhanov, Fayzullo N. Ernazarov,

Zuhra Abduraimova and Naima H. Bazarova

Peculiarities of Synthesis of Cobalt Ferrite on a Solar Furnace 488

Dmitry D. Dmitriev, Evgeny D. Mikhov, Andrey B. Gladyshev,

Vasily N. Ratushnyak, Andrey V. Lykho and Alexander V. Karavanov

Navigation Support for Group Use of Drones 498

Math Modeling. Numerical Experiment

Anton A. Koziratsky, Evgeny M. Shutko and Anton A. Barkalov

Efficiency of the Algorithm for Previous Detection of the State of a Transmitting Laser Means Based
on Reception and Analysis of Non-Stationary Pre-Generation Spontaneous Radiation 510

Vladimir B. Ponomarev

The Method of Calculating the Technological Parameters of Separation Equipment
for the Production of Fractional Quartz Sands 529

Evgeniy A. Golovenko and Evgeny A. Pavlov

Calculation and Optimization of the Housing of the Electric Drive of the Gas Gate Valve 538

Information and Communication Technologies

Mhnd Farhan

Performance of IDMA System with Various Types of Interleavers 558

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

Е. Н. Васильев

Измерение тепловых потоков в лабораторной модели термоэлектрического холодильника..... 440

И. В. Наумов, М. Н. Полковская,

М. А. Якупова, Э. С. Федоринова

Аналитическая оценка электропередачи по сетям филиала ПАО «Россети Волга» –
«Мордовэнерго» с возможностью создания прогностических моделей отказов 452

А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. Г. Батухтин,

А. В. Черепанов, А. Е. Крюков, Нгуен Куок Хиеу

Применение возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения
железных дорог постоянного тока 472

М. С. Пайзуллаханов, Ф. Н. Эрназаров,

Э. Абдураимова, Н. Х. Базарова

Особенности синтеза феррита кобальта на солнечной печи 488

Д. Д. Дмитриев, Е. Д. Михов, А. Б. Гладышев

В. Н. Ратушняк, А. В. Лыхо, А. В. Караванов

Навигационное обеспечение беспилотных летательных аппаратов для организации
их группового применения 498

Математическое моделирование. Численный эксперимент

А. А. Козирацкий, Е. М. Шутько, А. А. Баркалов

Эффективность алгоритма упреждающего обнаружения состояния передающего
лазерного средства на основе приема и анализа нестационарного
предгенерационного спонтанного излучения 510

В. Б. Пономарев

Методика расчета технологических параметров сепарационного оборудования
для получения фракционных кварцевых песков 529

Е. А. Головенко, Е. А. Павлов

Расчет и оптимизация корпуса электропривода газовой задвижки 538

Информационно-коммуникационные технологии

Мхнд Фархан

Производительность системы IDMA с различными типами интерлейверов..... 558

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: JWAVXN

УДК 537.32

**Measurement of Heat Fluxes in a Laboratory Model
of a Thermoelectric Refrigerator**

Evgeniy N. Vasil'ev*

*Institute of Computational Modelling SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 28.02.2025, received in revised form 04.05.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. The article presents a method for measuring and calculating heat fluxes in a laboratory model of a thermoelectric refrigerator. Using the developed methodology, studies of the main cooling characteristics in a wide range of temperature conditions and power supply parameters of the thermoelectric module were carried out. As a result of the research, the values of heat fluxes and thermal resistances of the thermally insulated body of a thermoelectric refrigerator, heat supply and removal devices were determined. From the measurement data, the load characteristics of the thermoelectric module are obtained at different values of the current strength and temperature of its hot side.

Keywords: thermoelectric module, heat meter, heat exchanger, thermal resistance, cooling capacity.

Citation: Vasil'ev E. N. Measurement of Heat Fluxes in a Laboratory Model of a Thermoelectric Refrigerator. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 440–451. EDN: JWAVXN



**Измерение тепловых потоков в лабораторной модели
термоэлектрического холодильника**

Е. Н. Васильев

*Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье представлена методика измерения и расчета тепловых потоков в лабораторной модели термоэлектрического холодильника. С помощью разработанной методики проведены исследования основных характеристик охлаждения в широком диапазоне температурных

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: ven@icm.krasn.ru

условий и параметров электропитания термоэлектрического модуля. В результате исследований определены величины тепловых потоков и термических сопротивлений теплоизолированного корпуса термоэлектрического холодильника, устройств подвода и отвода теплоты. Из данных измерений получены нагрузочные характеристики термоэлектрического модуля при разных значениях силы тока и температуры его горячей стороны.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, тепломер, теплообменник, термическое сопротивление, холодопроизводительность.

Цитирование: Васильев Е. Н. Измерение тепловых потоков в лабораторной модели термоэлектрического холодильника / Е. Н. Васильев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 440–451. EDN: JWAVXN

Введение

Термоэлектрические системы используются в качестве охлаждающих устройств во многих областях техники. Основным недостатком этой технологии является низкий холодильный коэффициент, особенно в режимах работы с высокой холодопроизводительностью. Повышение эффективности охлаждения возможно путем оптимизации проектирования и изготовления термоэлектрической системы, улучшения эффективности теплообмена в устройствах теплоподвода и теплоотвода. Также важен выбор оптимальных режимов работы, обеспечивающий максимальные характеристики системы охлаждения и позволяющий наиболее полно реализовать потенциал используемого термоэлектрического модуля (ТЭМ).

Оптимизация конструкции и режимов работы термоэлектрической системы должна проводиться с учетом рабочих характеристик ТЭМ и других узлов. Рабочие характеристики ТЭМ, как правило, приводятся производителями в технической документации для условий вакуума и фиксированного значения температуры горячей стороны (обычно 25 °С или 27 °С). На практике реальные условия эксплуатации ТЭМ могут существенно отличаться от условий, для которых приведены технические данные производителя. Кроме того, характеристики серийных ТЭМ могут отклоняться от заявленных вследствие влияния технологических факторов в процессе их изготовления, нестабильности параметров и старения термоэлектрических материалов [1]. Поэтому оптимизация и анализ режимов работы системы охлаждения должны основываться на достоверных данных и характеристиках ТЭМ и других узлов системы охлаждения для реальных температурных и иных условий эксплуатации.

Термоэлектрический модуль по своей сути является тепловым насосом, работа которого характеризуется холодопроизводительностью и холодильным коэффициентом. Определение этих характеристик, соответствующих условиям эксплуатации, требует проведения экспериментальных исследований, в ходе которых должны быть измерены тепловые потоки. Такие исследования позволяют провести экспериментальный стенд и лабораторная модель термоэлектрического холодильника, конструкция и описание которых приведены в работе [2]. Основным функциональным узлом лабораторной модели является отдельная секция термоэлектрического блока, конструкция которого описана в [3, 4]. В настоящей работе представлена методика расчета тепловых потоков и других характеристик лабораторной модели термоэлектрического холодильника по результатам измерения значений температуры и параметров электропитания ТЭМ.

Описание лабораторной модели термоэлектрического холодильника и системы измерений

Лабораторная модель термоэлектрического холодильника состоит из теплоизолированного корпуса холодильной камеры, внутри которого установлена секция термоэлектрического блока. Общий вид секции термоэлектрического блока приведен на рис. 1а. Теплота от секции отводится с помощью жидкостного алюминиевого теплообменника 1, в котором по цилиндрическим каналам циркулирует охлаждающая жидкость, подводимая по шлангам 2 от термостата. Жидкостный теплообменник прикреплен к горячей стороне термоэлектрического модуля 3. К холодной стороне ТЭМ присоединен медный конденсатор 4, в котором установлены три термосифона 5. На термосифоны нанизаны медные ребра 6 воздушного теплообменника, имеющие вид прямоугольных пластин с поперечными размерами $62 \times 77,5 \text{ мм}^2$ и толщиной 0,5 мм, расстояние между ребрами 4 мм.

В состав лабораторной модели входят следующие элементы: корпус холодильной камеры, секция термоэлектрического блока, вентилятор и электрический нагреватель. Качество теплоизоляции корпуса характеризуется величиной термического сопротивления, определяющей количество теплоты, поступающей из внешней среды в объем холодильника. Вентилятором обдуваются ребра воздушного теплообменника, при этом сам вентилятор является источни-

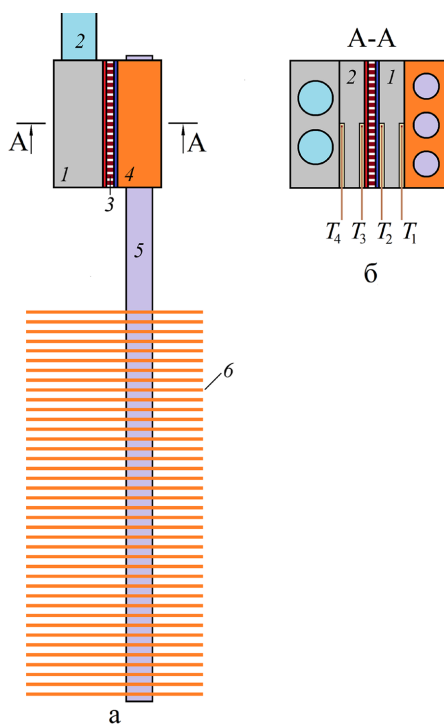


Рис. 1. Схема секции термоэлектрического блока: вид сбоку (а) 1 – жидкостный теплообменник, 2 – каналы для циркуляции жидкости, 3 – ТЭМ, 4 – конденсатор, 5 – термосифоны, 6 – ребра; разрез А-А секции с установленными тепломерами 1 и 2 (б)

Fig. 1. Schematic diagram of a thermoelectric block section: side view (a) 1 – liquid heat exchanger, 2 – channels for liquid circulation, 3 – TEM, 4 – condenser, 5 – thermosiphons, 6 – fins; section A-A of a section with installed heat meters 1 and 2 (b)

ком тепловыделения в объеме камеры. Регулирование подвода тепловой мощности, поступающей во внутренний объем холодильника, производится электрическим нагревателем. В итоге вся тепловая мощность через ребра воздушного теплообменника и термосифоны передается термоэлектрическому модулю, который отводит поступившую теплоту и собственное тепловыделение W в жидкостный теплообменник.

При проведении исследований в секции термоэлектрического блока был установлен термоэлектрический модуль ТВ-199–1.4–0.8 (DRIFT-0.8) (производитель ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург). По данным производителя, максимальные значения температурного перепада $\Delta T_{\text{ТЭМ}} = 74$ °С и холодопроизводительности $Q = 191$ Вт достигаются при максимальной силе тока $I_{\text{max}} = 11.8$ А и напряжении питания 25.9 В, эти значения получены в условиях вакуума при температуре горячей стороны ТЭМ 27 °С. Для обдува воздушного теплообменника был использован компактный вентилятор, который обеспечивал скорость воздушного потока на уровне 3 м/с при потребляемой мощности в диапазоне от 17 до 18 Вт в зависимости от напряжения внешней электросети.

Исследование характеристик лабораторной модели термоэлектрического холодильника проводилось на экспериментальном стенде [2]. Работа термоэлектрического модуля, электрического нагревателя и вентилятора обеспечивается блоками питания. В состав стенда входит термостат LOIP FT-311–80М, который осуществляет циркуляцию охлаждающей жидкости с заданной температурой. Система измерений и обработки информации обеспечивает фиксацию значений температуры и электрофизических параметров. Измерения температуры производились с помощью термопар, регистрация значений температуры выполнялась автоматизированным вычислительным комплексом на базе модульной измерительной системы L–Card E-270 и персонального компьютера. Для определения величин теплового потока была использована система из двух тепломеров. Значения температуры измерялись термопарами в различных точках лабораторной модели: на обеих сторонах тепломеров, в воздушном потоке внутри объема холодильной камеры (на входе и выходе воздушного теплообменника) и воздуха в помещении. Тепловые мощности, выделяемые вентилятором, нагревателем и термоэлектрическим модулем, равны их энергопотреблению и рассчитывались по измеренным значениям напряжения и силы тока для каждого из этих устройств. Измерения напряжения производились непосредственно на входе устройств, чтобы избежать влияния потерь в подводящих проводах.

Методика измерения и расчета тепловых потоков в лабораторной модели термоэлектрического холодильника

Одним из распространенных способов измерения теплового потока является метод дополнительной стенки [5]. Дополнительная стенка, являющаяся тепломером, устанавливается на поверхность, тепловой поток через которую необходимо определить. В лабораторной модели термоэлектрического холодильника такими поверхностями являются холодная и горячая стороны ТЭМ, а тепломер представляет собой металлическую прямоугольную пластину, имеющую равную с ТЭМ площадь. На противоположных поверхностях пластины установлены термодатчики, при однородном распределении теплового потока по этим поверхностям в соответствии с законом Фурье верно соотношение:

$$Q = \lambda \frac{\Delta T S}{\delta} = \frac{\Delta T}{R}. \quad (1)$$

Здесь $R = \delta/(\lambda S)$ – термическое сопротивление пластины, λ – коэффициент теплопроводности материала, S и δ – площадь теплопередающей поверхности и толщина пластины, ΔT – температурный перепад на пластине. В этом случае по известным геометрическим параметрам пластины, коэффициенту теплопроводности и измеренному значению ΔT в двух противоположных точках определяется величина теплового потока Q , при этом значения λ и δ должны быть известны с высокой точностью.

Рассматриваемая задача не соответствует идеальному случаю однородного теплового потока из-за особенностей устройств подвода и отвода теплоты. Так, теплопередача от термосифонов в устройстве подвода теплоты приводит к существенной неоднородности температурного поля конденсатора [6], вследствие этого изменение величины теплового потока на его границе с ТЭМ превышает 10 %. Теплопередача в устройстве теплоотвода также имеет неоднородное распределение, поскольку отвод теплоты в жидкостном теплообменнике осуществляется теплоносителем, протекающим по двум цилиндрическим каналам. Кроме того, термопары в тепломерах размещены в пазах, которые заполнены термопастой, это приводит к искажению температурного поля в точке измерения температуры и к отличию расстояния между термопарами от толщины тепломеров δ . Таким образом, в данном случае измерение теплового потока с помощью тепломера по стандартной методике может иметь значительную погрешность.

При проведении исследований характеристик лабораторной модели термоэлектрического холодильника была разработана дифференциальная методика определения тепловых потоков, которая основана на сопоставлении температурных перепадов в двух тепломерах, прикрепленных к обеим сторонам ТЭМ (рис. 1б). В тепломере 1, прикрепленном к холодной стороне ТЭМ, размещены термопары для определения значений температур T_1 и T_2 на границах с конденсатором и ТЭМ. Аналогично в прикрепленном к горячей стороне ТЭМ тепломере 2 с помощью термопар определяются значения температур T_3 и T_4 на границах с ТЭМ и жидкостным теплообменником. Тепломеры были изготовлены одинаковыми в виде пластин толщиной 12 мм из алюминиевого сплава, марка и коэффициент теплопроводности которого неизвестны. Контактные зазоры и пазы тепломеров, в которых размещены термопары, были заполнены термопастой КПТ-8 с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0.7\text{--}1$ Вт/(м·К) в зависимости от температурных условий.

Методика включает в себя как измерение параметров электропитания ТЭМ и температурных перепадов на тепломерах, так и дальнейший расчет тепловых потоков, проходящих через тепломеры. Величина термического сопротивления тепломера не зависит от величины проходящего через него теплового потока, а определяется коэффициентом теплопроводности материала, его геометрическими размерами и формой. Поэтому перепад температуры прямо пропорционален величине теплового потока даже в случае неоднородных распределений температуры и теплового потока по площади тепломера.

Для тепломера 1, прикрепленного к холодной стороне ТЭМ, тепловой поток Q определяется формулой:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_1}. \quad (2)$$

Здесь R_1 – неизвестное термическое сопротивление тепломера 1. Тепловой поток через тепломер 2, прикрепленный к горячей стороне ТЭМ, описывается следующим выражением:

$$Q + W = \frac{T_3 - T_4}{R_2}. \quad (3)$$

Здесь R_2 – неизвестное термическое сопротивление тепломера 2, W – мощность энергопотребления ТЭМ, определяемая через измеренные значения напряжения U и силы тока I :

$$W = UI. \quad (4)$$

Различие термических сопротивлений тепломеров выразим через коэффициент пропорциональности k :

$$R_1 = kR_2. \quad (5)$$

На значение этого коэффициента пропорциональности влияют различные факторы: неоднородность тепловых потоков в тепломерах, наличие в них пазов и термопасты, расположение термопар и пр.

В результате несложных преобразований уравнений (1) – (5) получим выражение для теплового потока, поступающего к холодной стороне ТЭМ:

$$Q = \frac{UI}{k(T_3 - T_4)/(T_1 - T_2) - 1}. \quad (6)$$

Величина теплового потока, уходящего с горячей стороны ТЭМ, равна $Q + W$. Следует отметить, что выражение (6) включает в себя только измеренные значения температуры, силы тока и напряжения, а значения коэффициента теплопроводности материалов и геометрические параметры пластины в нем отсутствуют.

Величина коэффициента пропорциональности k определялась в предварительных калибровочных экспериментах при выключенном электропитании ТЭМ, в этом случае при $W = 0$ с учетом (2) и (3) $k = R_1/R_2 = (T_1 - T_2)/(T_3 - T_4)$. В данных экспериментах секция термоэлектрического блока находилась вне корпуса холодильника, при этом ее узел «конденсатор – ТЭМ – жидкостный теплообменник» был укрыт слоем теплоизоляции. Величина коэффициента k определялась при различных условиях отвода и подвода теплоты, которые менялись путем изменения температуры охлаждающей жидкости и условий обдува воздушного теплообменника. В качестве параметра, характеризующего условия теплообмена, была выбрана разница средних температур тепломеров $\Delta T = 0,5(T_1 + T_2) - 0,5(T_3 + T_4)$, определяющая направление и интенсивность теплопередачи. Полученные значения k , соответствующие установившемуся процессу, отображены на рис. 2 кружками. При положительных значениях ΔT подвод теплоты обеспечивался за счет обдува воздушного теплообменника вентилятором, при этом температура охлаждающей жидкости была ниже температуры окружающего воздуха, в различных экспериментах она варьировалась с помощью термостата от минус 20 °С до плюс 15 °С. При отрицательном значении ΔT теплопередача через тепломеры осуществлялась в противоположном направлении. В этом случае температура охлаждающей жидкости имела положительное значение (40 °С), а ребра и термосифоны охлаждались льдом. По мере таяния льда условия его контакта с ребра-

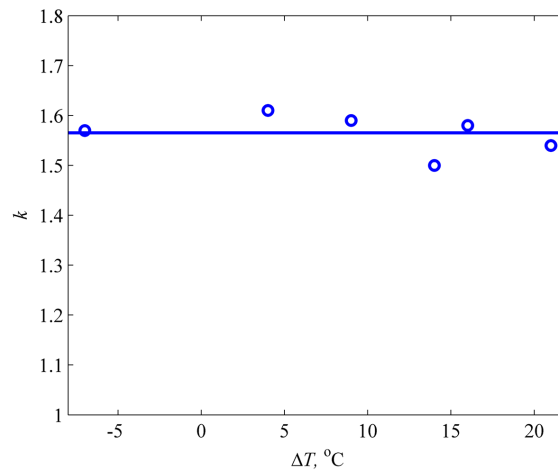


Рис. 2. Значения коэффициента пропорциональности k в зависимости от разницы средних температур тепломеров ΔT

Fig. 2. Values of the proportionality coefficient k depending on the difference in the average temperatures of the heat meters ΔT

ми менялись, поэтому в этом случае приведено среднее значение k для различных моментов времени.

Из приведенных на рис. 2 значений коэффициента пропорциональности k не видна их зависимость от разницы средних температур тепломеров ΔT . Среднее значение коэффициента пропорциональности равно 1,57, этот уровень отображен на рис. 2 сплошной линией. Разброс k от среднего не превышает 4,5 % и вызван, по-видимому, сочетанием погрешности измерения температуры термодарами (на уровне 0,1 °C) и сравнительно малых перепадов температуры на тепломерах, не превышающих 3 °C. Полученное значение коэффициента пропорциональности $k = 1,57$ было использовано в дальнейших исследованиях. Следует отметить, что данное значение коэффициента пропорциональности применимо только для этой исследованной конструкции секции с тепломерами, если ее собрать заново, значение k с большой вероятностью станет иным, прежде всего из-за изменения контактных термических сопротивлений в зазорах и пазах, заполненных термопастой.

Результаты измерения тепловых потоков и других характеристик лабораторной модели термоэлектрического холодильника

После проведения предварительных калибровочных экспериментов задача дальнейшего исследования заключалась в определении тепловых потоков для последующего расчета основных характеристик всего холодильника в целом и его составных элементов в отдельности. К таким характеристикам относятся холодопроизводительность и холодильный коэффициент холодильника, нагрузочные характеристики ТЭМ, термические сопротивления корпуса, устройств отвода и подвода теплоты. Холодопроизводительность Q секции термоэлектрического блока равна сумме тепловых мощностей, которая отводится из объема холодильника:

$$Q = W_{\text{в}} + W_{\text{н}} + Q_{\text{к}},$$

Здесь $W_{\text{в}}$ и $W_{\text{н}}$ – мощности энергопотребления вентилятора и нагревателя, $Q_{\text{к}}$ – тепловой поток через стенки корпуса.

Для анализа режимов охлаждения термоэлектрического холодильника должны быть известны характеристики серийного образца ТЭМ в условиях, соответствующих эксплуатации в воздушной среде. Нагрузочные характеристики представляют собой прямые, определяющие зависимости холодопроизводительности ТЭМ от разности температур на его сторонах для заданной силы тока и температуры горячей стороны ТЭМ. Крайние точки прямых характеризуют максимальные значения температурного перепада $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ и холодопроизводительности Q , достижимые в заданных условиях. Для построения нагрузочной прямой достаточно двух точек, относящихся к режимам с различной тепловой мощностью Q .

При измерении нагрузочных прямых для снижения влияния от нестабильности внешних условий секция термоэлектрического блока с тепломерами была помещена в корпус лабораторной модели холодильника. В экспериментах варьирование Q производилось путем регулирования мощности нагревателя $W_{\text{н}}$, это также приводило к изменению температуры внутри холодильника и, следовательно, величины $Q_{\text{к}}$ и в малой степени $W_{\text{в}}$. Измерение значений T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , U и I производилось после установления теплового равновесия в системе. Холодопроизводительность Q рассчитывалась по измеренным значениям по формуле (6), а величина разницы температур рассчитывалась в виде $\Delta T = T_3 - T_2$. Следует отметить, что измеренное значение ΔT ниже реального перепада температур на ТЭМ, поскольку термопары размещены в пазах тепломеров и имеют тепловой контакт с ТЭМ через слой термопасты, на котором теряется некоторая часть произведенного ТЭМ температурного перепада. Рассчитать величину этой потери температурного перепада не представляется возможным из-за неопределенности параметров теплового контакта термопары и ТЭМ.

Измерения нагрузочных характеристик проведены в широком диапазоне температур горячей стороны ТЭМ. Для температуры горячей стороны $T_{\text{h}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ рассчитанные значения Q и ΔT на рис. 3 отмечены кружками, соответствующие нагрузочные прямые отображены сплошными линиями этого же цвета. Пунктирными линиями приведены для сравнения нагрузочные прямые из данных производителя, полученные для условий вакуума при $T_{\text{h}} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Численные значения на графике указывают величину силы тока для соответствующих прямых в процентах от максимальной величины ($I_{\text{max}} = 11,8\text{ А}$). При величине тока $I = 0,5 \cdot I_{\text{max}}$ и $0,75 \cdot I_{\text{max}}$ измеренные нагрузочные прямые расположены ниже соответствующих прямых от производителя. Так, для $I = 0,75 \cdot I_{\text{max}}$ измеренное значение $T_{\text{max}} = 67,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже на 5 %, чем по данным производителя ($T_{\text{max}} = 70,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), а $Q_{\text{max}} = 151,2\text{ Вт}$ ниже на 7,5 % (у производителя $Q_{\text{max}} = 163,5\text{ Вт}$).

Нагрузочные характеристики, как правило, приводятся производителями для одного значения температуры горячей стороны ТЭМ, в то же время в реальных условиях эксплуатации температурные условия могут существенно отличаться. Поэтому определение влияния температурных условий является важным для оценки эффективности термоэлектрических систем охлаждения. Результаты измерений нагрузочных характеристик при температуре горячей стороны ТЭМ $T_{\text{h}} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ отображены на рис. 4, здесь численные значения также указывают величину силы тока в процентах от I_{max} . Снижение температуры горячей стороны привело к заметному снижению эффективности ТЭМ, так, для $I = 0,75 \cdot I_{\text{max}}$ максимальное значение температурного перепада снизилось на 5,3 %, а холодопроизводительности – на 6,6 %.

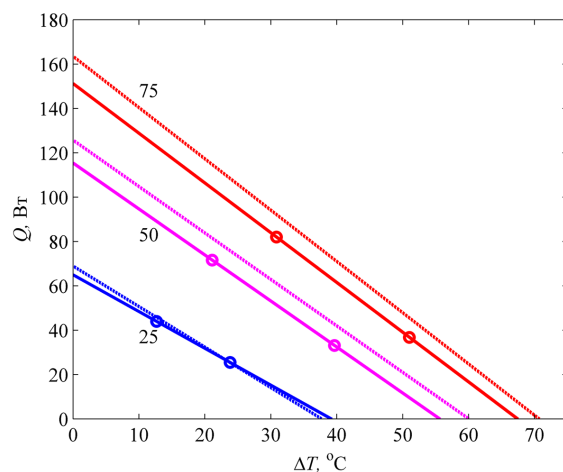


Рис. 3. Нагрузочные характеристики термоэлектрического модуля при $T_h = 25\text{ °C}$, на прямых указана сила тока в процентах от максимального значения $I_{\max}$

Fig. 3. Load characteristics of the thermoelectric module at $T_h = 25\text{ °C}$, the lines indicate the current strength as a percentage of the maximum value $I_{\max}$

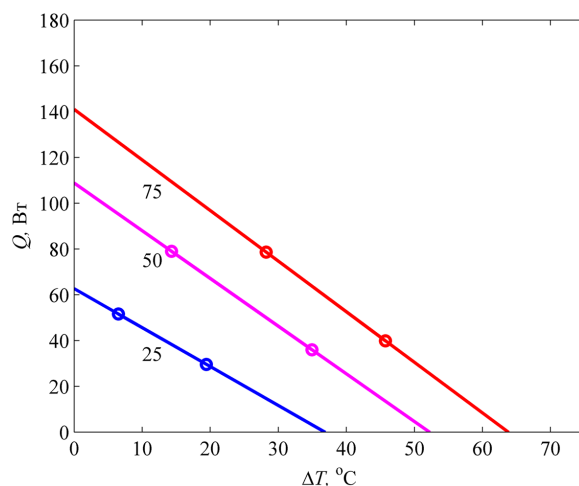


Рис. 4. Нагрузочные характеристики термоэлектрического модуля при $T_h = 14\text{ °C}$, на прямых указана сила тока в процентах от максимального значения $I_{\max}$

Fig. 4. Load characteristics of the thermoelectric module at $T_h = 14\text{ °C}$, the lines indicate the current strength as a percentage of the maximum value $I_{\max}$

Нагрузочные характеристики на рис. 3 и 4 приведены только до значений силы тока $I = 0,75 \cdot I_{\max}$. Такое значение силы тока и напряжения производители термоэлектрических систем в сопроводительной документации обычно предлагают в качестве оптимального параметра электропитания ТЭМ [7, 8]. Кроме того, расчеты режимов охлаждения с учетом термических сопротивлений устройств отвода и подвода теплоты показали, что оптимальные значения силы тока могут быть существенно ниже этого рекомендованного значения [9, 10]. В ходе экспериментальных исследований лабораторной модели термоэлектрического холодильни-

ка максимумы холодопроизводительности также были получены при значениях силы тока $I < 0,75 \cdot I_{\max}$ [2].

Нагрузочные прямые на рис. 3 и 4 строились по двум базовым точкам, выбор режимов, соответствующих этим точкам, проводился следующим образом. Правые точки на каждой прямой получены в экспериментах с отключенным нагревателем и работающим вентилятором в номинальном режиме. При определении левых точек мощность нагревателя выбиралась такой, чтобы средняя температура в объеме холодильной камеры равнялась температуре окружающего воздуха. В этом случае теплообмен через стенки корпуса практически отсутствовал, и полное тепловыделение в объеме холодильной камеры равнялось сумме известных потребляемых мощностей вентилятора и нагревателя. Таким образом, в ходе таких экспериментов дополнительно проводилась проверка представленной методики, в результате которой было получено соответствие измеренных тепловых потоков и суммарного тепловыделения в объеме камеры. Следует отметить, что расстояние между базовыми точками для построения нагрузочных прямых может быть расширено за счет смещения правых точек направо путем снижения мощности вентилятора, а левых точек налево при увеличении мощности нагревателя.

Измеренные значения температур и тепловых потоков позволяют с помощью соотношения (1) рассчитать термические сопротивления корпуса, устройств отвода и подвода теплоты. Для определения величины теплового потока через стенки корпуса на основе показаний термомпар в тепломерах рассчитывался суммарный тепловой поток Q , поступающий на холодную сторону ТЭМ при отключенном нагревателе. Величина теплового потока через стенки определялась как разница суммарного теплового потока и тепловыделения вентилятора. Для определения величины ΔT измерения температуры воздуха проводились в объеме холодильной камеры и помещении, причем значение внутри камеры вычислялось как средняя арифметическая величина температур на входе и на выходе воздушного теплообменника. В ходе обработки результатов измерений в различных тепловых режимах получено среднее значение термического сопротивления корпуса 1,8 К/Вт при номинальной мощности вентилятора.

Полное термическое сопротивление устройства подвода теплоты, включающего в себя ребра воздушного теплообменника, тепловые контакты, термосифоны и конденсатор, определялось по показаниям термомпар как отношение разницы между значениями температуры T_1 и средней температуры воздуха в камере к измеренному суммарному тепловому потоку Q , поступающему к ТЭМ. Термическое сопротивление в различных режимах работы и при номинальной мощности вентилятора находилось в диапазоне от 0,27 до 0,3 К/Вт. Суммарное термическое сопротивление устройства отвода теплоты (жидкостного теплообменника) аналогично определялось как отношение разницы между температурой T_4 и заданной температурой охлаждающей жидкости, поступающей из термостата, к тепловой мощности $Q+W$, отводимой от горячей стороны ТЭМ. Термическое сопротивление теплоотводящей системы в различных режимах работы имело значения от 0,1 до 0,12 К/Вт.

Таким образом, представленная методика определения тепловых потоков позволяет определить нагрузочные прямые ТЭМ и другие основные характеристики термоэлектрической системы охлаждения. Такие данные необходимы для расчета и оптимизации режимов термоэлектрического охлаждения в реальных условиях эксплуатации [9–11].

Заключение

Представленная методика расчета тепловых потоков в лабораторной модели термоэлектрического холодильника основана на измерении параметров электропитания ТЭМ и значений температуры в системе из двух дифференциальных тепломеров. Методика позволяет измерять тепловые потоки на обеих сторонах ТЭМ при различной тепловой нагрузке, что дает возможность определять основные характеристики в широком диапазоне температурных условий. С помощью данного алгоритма нагрузочные характеристики могут быть установлены в рамках конструкции исследуемой системы охлаждения для реальных условий ее эксплуатации. В ходе проведенных исследований были построены нагрузочные характеристики термоэлектрического модуля ТВ-199–1.4–0.8 (DRIFT-0.8), а также рассчитаны характеристики основных элементов лабораторной модели термоэлектрического холодильника: термические сопротивления устройств подвода и отвода теплоты, корпуса холодильника. Представленная методика определения тепловых потоков и полученные экспериментальные данные могут быть использованы для оптимизации конструкции и режимов работы термоэлектрических систем охлаждения.

Список литературы / References

- [1] Покорный Е. Г., Щербина А. Г. *Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств*. Л.: Наука, 1969. 206 с. [Pokorny E. G., Shcherbina A. G. *Calculation of semiconductor cooling devices*. Leningrad: Nauka, 1969 (in Rus.)]
- [2] Васильев Е. Н., Сиротинин А. А. Исследование характеристик лабораторной модели термоэлектрического холодильника. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2025, 18(2), 176–185 [Vasil'ev E. N., Sirotinin A. A. Study of characteristics of thermoelectric refrigerator laboratory model, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2025, 18(2), 176–185 (in Rus.)]
- [3] Васильев Е. Н., Гейнц Э. Р., Деревянко В. А., Коков Е. Г., Кукушкин С. В. Термоэлектрический блок охлаждения. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2019, 12(2), 146–152 [Vasil'ev E. N., Gejnts E. R., Derevyanko V. A., Kokov E. G., Kukushkin S. V. Thermoelectric cooling block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(2), 146–152 (in Rus.)]
- [4] Патент 2511922 (РФ) от 10.04.14 г, МПК F25B 21/02. *Термоэлектрический блок охлаждения* / В. А. Деревянко, В. Н. Гладущенко, Э. Р. Гейнц, Е. Г. Коков, Е. Н. Васильев, В. В. Руссков [Patent 2511922 (RF), dated 10.04.14, MPK F25B 21/02. Thermoelectric cooling unit. / V. A. Derevjanko, V. N. Gladushchenko, E. R. Gejnts, E. G. Kokov, E. N. Vasil'ev, V. V. Russkov (in Rus.)]
- [5] Геращенко О. А. *Основы теплометрии*. Киев: Наукова думка, 1971. 192 с. [Gerashchenko O. A. *Fundamentals of Thermometry*. Kiev: Naukova Dumka, 1971, 192 p. (in Rus.)]
- [6] Васильев Е. Н. Моделирование теплопередачи в устройстве подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2023, 16(1), 82–91 [Vasil'ev E. N. Modeling of heat transfer in the heat supply device of the thermoelectric cooling unit, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2023, 16(1), 82–91 (in Rus.)]
- [7] Официальный сайт компании Криотерм. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kryothermtec.com/ru/assembly-instructions.html#punkt9> – Заглавие с экрана. [Official website of the Kryotherm company [Electronic resource] – Access: <https://kryothermtec.com/ru/assembly-instructions.html#punkt9>]

[8] Официальный сайт компании Экоген. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ecogenthermoelectric.com/ru/technicheskaya-podderzhka.html#punkt12> – Заглавие с экрана. [Official website of the Ecogen company [Electronic resource] – Access: <https://ecogenthermoelectric.com/ru/technicheskaya-podderzhka.html#punkt12>]

[9] Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения. *Журнал технической физики*, 2021, 91(5), 743–747 [Vasil'ev E. N. Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system. *Technical Physics*, 2021, 66(5), 720–724]

[10] Васильев Е. Н. О важности термических сопротивлений системы охлаждения при выборе термоэлектрического модуля. *Журнал технической физики*, 2023, 93(5), 615–621 [Vasil'ev E. N. On the importance of thermal resistances of the cooling system when choosing a thermoelectric module. *Technical Physics*. 2023. 68(5), 574–579 (in Rus.)]

[11] Васильев Е. Н. Согласование параметров термоэлектрической системы охлаждения теплонагруженных элементов электроники, *Микроэлектроника*, 2024, 53(5), 407–412 [Vasil'ev E. N. Coordination of parameters of a thermoelectric system for cooling heat-loaded electronic elements, *Russian Microelectronics*, 2024, 53(5), 464–470 (in Rus.)]

EDN: LPCOFL

УДК 621.311

Analytical Assessment of Power Transmission Through the Networks of the PJSC “ROSSETI Volga – Mordovenergo” Branch with the Possibility of Creating Predictive Failure Models

Igor V. Naumov^{a, b*}, Marina N. Polkovskaya^b,
Marina A. Yakupova^b, Elvira S. Fedorinova^b

^a*Irkutsk National Research Technical University*

^b*Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky
Irkutsk, Russian Federation*

Received 15.04.2025, received in revised form 28.04.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. The purpose of the scientific article is to consider the possibilities of creating predictive models for assessing accidents in the electrical networks of PJSC ROSSETI Volga – Mordovenergo based on an analysis of the dynamics of failures for 2018–2023. Based on the proposed classification, the failure rate was analyzed and the percentage of failures of varying intensity relative to the total number of failures was determined. It has been established that the largest number of emergency shutdowns is accounted for by failures, as a result of which the under-output of EE does not exceed 1 thousand kWh. Such failures accounted for 93.47 % (7130 ed.) of the total number of failures during the study period, while the number of undelivered EE as a result of these failures amounted to 445,497 thousand kWh. High-intensity failures, which resulted in a power outage of more than 10 thousand kWh, account for only 0.079 % of the total number of failures. Nevertheless, they account for 7.9 % of the total under-output of EE (52.09 thousand kWh). The main causes of emergency situations are considered and a probabilistic and statistical analysis of the possibility of failure events before 2026 for the main reasons is performed. It is determined that trend models for March, May, June, and September can be used to predict the number of equipment failures due to non-compliance with maintenance deadlines; autoregressive models for February, October, and December. General scientific methods of numerical, probabilistic and statistical analysis and forecasting methods were used as methods. The results of the study may be of interest to the management of electric grid companies when developing emergency response measures for the future.

Keywords: emergency situation, failure events, under-discharge of electricity, autoregressive equation, probability of failure.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: professornaumov@list.ru

Citation: Naumov I. V., Polkodskaya M. N., Yakupova V. F., Fedorinova. E. S. Analytical assessment of power transmission through the networks of the PJSC “Rosseti Volga – Mordovenergo” branch with the possibility of creating predictive failure models. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 452–471. EDN: LPCOFL



Аналитическая оценка электропередачи по сетям филиала ПАО «Россети Волга» – «Мордовэнерго» с возможностью создания прогностических моделей отказов

И. В. Наумов^{а, б}, М. Н. Полковская,^б

М. А. Якупова^б, Э. С. Федоринова^б

*^аИркутский национальный исследовательский
технический университет*

*^бИркутский государственный аграрный университет
имени А. А. Ежевского
Российская Федерация, Иркутск*

Аннотация. Целью научной статьи является рассмотрение возможностей создания прогностических моделей для оценки аварийности в электрических сетях компании ПАО «Россети Волга» – «Мордовэнерго» на основе анализа динамики отказов за 2018–2023 гг. На основе предложенной классификации произведен анализ интенсивности отказов и установлено процентное соотношение отказов различной интенсивности по отношению к общему количеству отказов. Установлено, что наибольшее количество аварийных отключений приходится на долю отказов, в результате которых недоотпуск ЭЭ не превышает 1 тыс. кВт·ч. На долю таких отказов приходится 93,47 % (7130 отк.) всего количества отказов за исследуемый период, при этом количество недопоставленной ЭЭ в результате этих отказов составило 445,497 тыс. кВт·ч. Отказы высокой интенсивности, в результате которых перерыв электроснабжения составил более 10 тыс. кВт·ч., составляют всего 0,079 % всего количества отказов. Тем не менее на их долю приходится 7,9 % всего недоотпуска ЭЭ (52,09 тыс. кВт·ч.). Рассмотрены основные причины возникновения аварийных ситуаций и произведен вероятностно-статистический анализ возможности возникновения событий отказов до 2026 г. по основным причинам. Определено, что для прогнозирования числа отказов оборудования по причине несоблюдения сроков технического обслуживания можно использовать трендовые модели для марта, мая, июня и сентября; авторегрессионные модели – для февраля, октября и декабря. В качестве методов использовались общенаучные методы численного, вероятностно-статистического анализа и методы прогнозирования. Результаты исследования могут представлять интерес для руководства электросетевых компаний при разработке противоаварийных мероприятий на перспективу.

Ключевые слова: аварийная ситуация, события отказов, недоотпуск электроэнергии, авторегрессионное уравнение, вероятность возникновения отказа.

Цитирование: Наумов И. В. Аналитическая оценка электропередачи по сетям филиала ПАО «Россети Волга» – «Мордовэнерго» с возможностью создания прогностических моделей отказов / И. В. Наумов, М. Н. Полковская, М. А. Якупова, Э. С. Федоринова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 452–471. EDN: LPCOFL

Ежегодное увеличение электропотребления в нашей стране связано с всевозрастающими темпами роста всех отраслей хозяйственной деятельности государства, что стало возможным

вследствие ужесточения санкционной политики западных государств и развития российского товаропроизводства. В соответствии с [1] спрос на электрическую энергию по Единой энергосистеме (ЕЭС) России к концу 2027 г. оценивался в размере 1159,905 млрд кВт·ч, но уже на конец 2024 г. общий объем электропотребления в ЕЭС составил 1,192 трл кВт·ч [2]. И это связано не только с повышенными темпами выпуска валовой продукции всех отраслей хозяйственной деятельности, но также и с продолжающейся специальной военной операцией, требующей значительных энергетических затрат при круглосуточном производстве гигантского количества военной продукции. В связи с этим особое внимание всех электросетевых структур должно быть направлено на сокращение величины недоотпуска электрической энергии (ЭЭ), связанного с возникновением различных аварийных ситуаций при транспортировке ЭЭ к месту ее потребления. Это является одной из важнейших задач Российской электроэнергетики.

Надежность транспорта электрической энергии (ЭЭ) является одним из наиболее значимых критериев оценки уровня эффективности электроснабжения. При этом передача ЭЭ посредством воздушных линий электропередачи является наиболее уязвимым способом ее транспорта, поскольку зависит от многочисленных факторов, связанных с территориальными и климатическими особенностями местности, условий эксплуатации, степени старения и износа основных элементов электрических сетей.

Осуществление систематического анализа уровня аварийности многочисленных электроэнергетических сетевых компаний на территории России, установление причинности возникновения событий тех или иных отказов, установление взаимосвязи возникновения аварий с сезонными, климатическими и другими особенностями отдельных территорий – все это позволяет создавать надежную базу данных аварийности в структурных подразделениях ПАО «Россети». А накопление таких данных, в свою очередь, позволяет осуществлять превентивную оценку возможных нарушений электрообеспечения для отдельных компаний на определенную перспективу.

Следует отметить еще один немаловажный факт. Современное состояние электросетевого оборудования внушает серьезные опасения с точки зрения его функционирования. К примеру, износ электрических сетей Кемеровской области составляет 92 %, Белгородской – 67 %, Самарской – 56 %; электрические сети «Тверьэнерго» изношены на 75 %, «Ярэнерго» – на 70 % [3, 4]. Кроме того, многие электрические сети компании ПАО Россети превысили нормативный срок эксплуатации. Так, для ПАО «Россети Волга» доля оборудования и линий электропередачи (ЛЭП) со сверхнормативным сроком службы составляет: ПАО «Россети Московский регион» – 51,2 и 53,6 %, сети «Самараэнерго» – 36,2 и 21,82 %; «Пензаэнерго» – 79,4 и 49,9 %, «Оренбургэнерго» – 71,27 и 72,94 %, сети «Чуваэнерго» – 60,08 и 40,84 %, сети Мурманской области – 85,51 и 59,36 %, Свердловской области – 72,8 и 54,4 %. Для электрических сетей «Мордовэнерго» – 69,99 и 63,6 % [5]. Таким образом, обеспечение надежного транспорта ЭЭ по системам электропередачи становится одной из главенствующих задач обеспечения бесперебойного электроснабжения всех видов электропотребления. При этом разработка противоаварийных мероприятий (ПАМ) невозможна без аналитической оценки возникающих аварийных ситуаций, что позволяет синтезировать инженерно-технические решения, направленные на достижение цели ПАМ – повышения уровня безаварийной доставки требуемых объемов ЭЭ к месту потребления. И одной из составляющих такого синтеза может являться получение

прогнозных значений аварийных ситуаций, позволяющих с определенной вероятностью предсказать возможность проявления определенных видов отказов в исследуемых электрических сетях в перспективе.

Прогнозирование уровня надежности обеспечения электроэнергией во многом снижает риски перерывов электроснабжения и, соответственно, способствует не только повышению эффективности использования ЭЭ, но также и сохранности элементов электрических сетей и основного электрооборудования. Это становится возможным вследствие проведения соответствующих превентивных мероприятий, разработанных на основе данных прогностического анализа функционирования электрических исследуемых сетей.

В настоящее время наиболее используемыми инструментами прогнозирования количества аварийных отключений (АО) (отказов) в электрических сетях являются методы, основанные на интерполяции временных рядов выборки данных, математическом ожидании отказов, а также на авторегрессионных и трендовых моделях изменения прогнозируемой величины. Основу данных методов составляет аналитическая оценка предшествующего ряда данных выборки по АО объекта исследования и расширение полученных тенденций для создания прогнозных характеристик исследуемого показателя на определенную перспективу. Безусловно, учесть влияние всех возможных факторов для получения превентивной оценки АО в электрических сетях невозможно, поскольку флуктуация отдельных значений ряда выборки данных порой носит непредсказуемый характер. Особенно это свойственно тем территориям, где в течение суток могут происходить резкие изменения климатических характеристик: температуры, влажности, атмосферных явлений.

Тем не менее современные технологии прогнозирования позволяют получить максимально приближенные к действительности данные по превентивным отказам в электрических сетях исследуемых объектов.

В научной литературе вопросам создания прогнозных моделей отказов в электрических сетях посвящено достаточное количество исследований [6–10]. Мы также неоднократно обращались к теме создания прогностических характеристик аварийных отключений на определенную перспективу в электрических сетях различных филиалов ПАО «Россети» [11–15]. При этом создавались прогнозные модели не только самих событий отказов, но также и основных причин, по которым эти отказы могут возникать в исследуемых электрических сетях.

Целью статьи является исследование возможности получения превентивных значений отказов и причин их возникновения в электрических сетях филиала ПАО «Россети Волга» – «Мордовэнерго» (далее по тексту МЭ). Создание прогнозных моделей осуществлялось на основе данных исследования аварийных отключений в электрических сетях МЭ за период 2018–2023 гг.

Анализ аварийных отключений МЭ

На основании закона о раскрытии информации [16] и при использовании сведений, опубликованных в открытом доступе [17], произведено исследование состоявшихся событий отказов и величины недоотпуска ЭЭ в результате этих отказов. Количественная характеристика отказов представлена на рис. 1.

Анализ рис. 1 показал следующее. Общее количество аварийных отключений в электрических сетях МЭ за период 2018–2023 гг. составило 7628 шт. Учитывая тот факт, что протяжен-

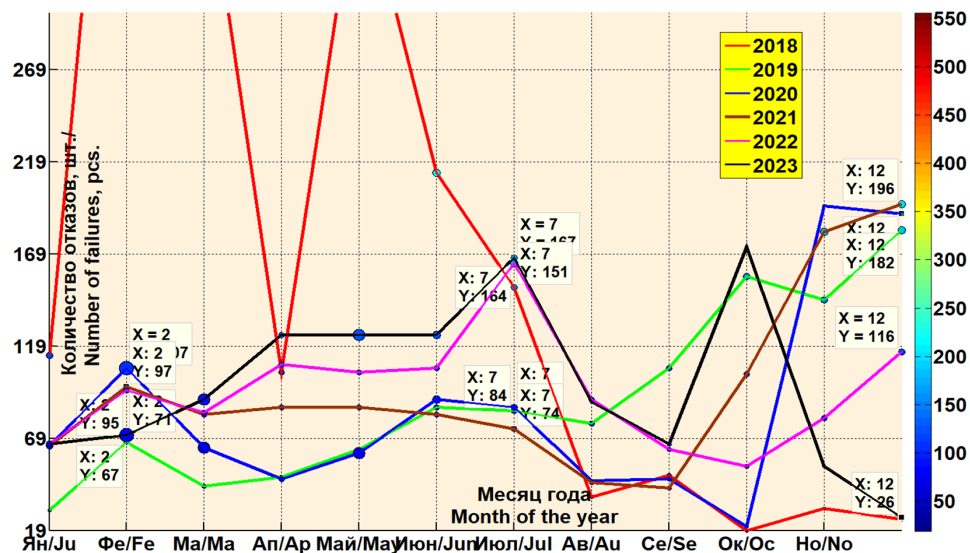


Рис. 1. Динамика изменения количества отказов в электрических сетях МЭ за 2018–2023 гг.

Fig. 1. Dynamics of the change in the number of failures in the electrical networks of the Miz 2018–2023

ность исследуемых электрических сетей МЭ составляет 20320, 3 км [17], удельная аварийность в сетях компании достигает 0,4 отказа на 1 км длины ЛЭП. При этом наибольшее количество отключений – 27,15 % (2071 шт.) – пришлось на 2018 г.¹, наименьшее соответствует 2020 г. – 13,37 % (1020 шт.).

Как видно из диаграмм рис. 1, динамика изменения количества отказов по месяцам каждого года не имеет характерного их снижения или увеличения. Так, с 2018 по 2020 гг. наблюдается устойчивое снижение отказов: в 2019 г. снижение отказов по отношению к 2018 г. составило 47,5 % (с 2071 г. до 1088 шт.); в 2020 г. снижение отказов по отношению к 2019 г. составило 6,25 %. Затем в 2021 г. количество аварий увеличивается на 11,76 % по отношению к 2020 г., в 2022 г. снижается не намного (на 0,7 %), но в 2023 г. вновь возрастает уже на 4 % по отношению к 2022 г. и на 15,2 % по отношению к 2020 г. При этом месяцем года, в котором происходит наибольшее количество аварийных ситуаций, является февраль. За анализируемый период на долю этого месяца пришлось чуть более 13 % всех аварийных отключений.

При этом большая часть повреждений в этом месяце пришлась на 2018 г. – 56 % (556 отказов в 2018 г. из 993). Наименьшее количество повреждений соответствует сентябрю – 54,9 % (374 отк.). Количество отказов по другим месяцам исследуемого периода распределилось следующим образом: январь – 5,5 % (406 отк.); март – 9,86 % (752 отк.); апрель – 6,82 % (520 отк.); май – 10,76 % (821 отк.); июнь – 9,22 % (703 отк.); июль – 9,52 % (726 отк.); август – 5,03 % (384 отк.); октябрь – 6,92 % (528 отк.); ноябрь – 8,98 % (685 отк.) и декабрь – 9,65 % (736 отк.).

Аварийные ситуации, произошедшие в сетях МЭ за исследуемый период, привели к недоотпуску ЭЭ, динамика которого представлена на рис. 2 Суммарному количеству произошедших

¹ На графике рис. 1 максимальное количество отказов в 2018 г. составило: в феврале – 556 шт., в марте 390 шт. и в мае – 381 шт. Эти три точки находятся вне представленных пределов диаграммы с тем, чтобы более отчетливо были обозначены отказы по другим годам исследуемого периода, количество которых находится в пределах 300.

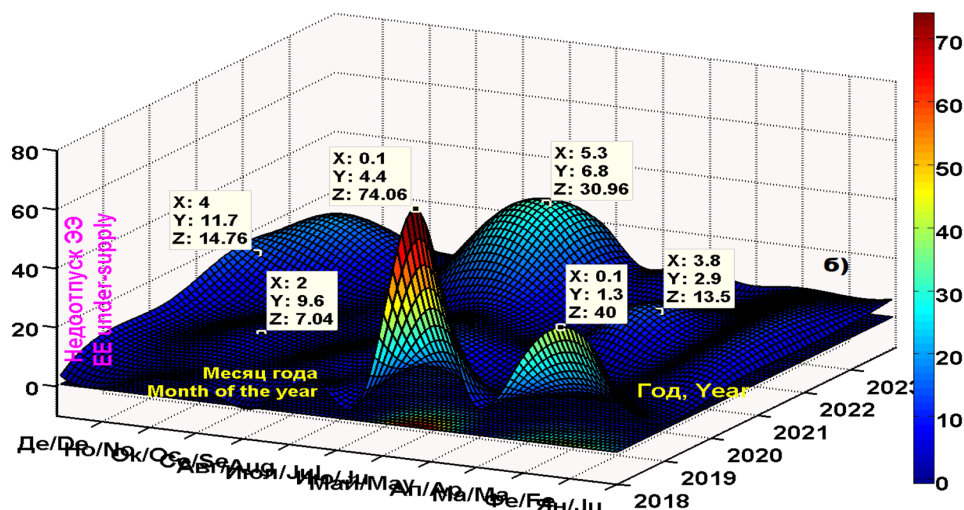


Рис. 2. Диаграмма изменения величины недоотпуска электрической энергии в сетях МЭ за 2018–2023 гг.

Fig. 2. Diagram of the change in the amount of under-output of electric energy in the ME networks 2018–2023.

за исследуемый период отказов соответствует величина недопоставленной электроэнергии, равная 659,1 тыс. кВт·ч. При этом аналогично наибольшему количеству отказов наибольший недоотпуск ЭЭ также соответствует 2018 г. – 31,82 % от общего количества (209,707 тыс. кВт·ч.). Далее в 2019 г. происходит резкое уменьшение недопоставленной ЭЭ – 10,95 % (72,1946 тыс. кВт·ч.), а затем вновь происходит увеличение недопоставки: в 2020 г. – 11,38 % (75,032 тыс. кВт·ч.); 2021–13,08 % (86,2148 тыс. кВт·ч.) и в 2022–21,31 % (140,472 тыс. кВт·ч.). И только в 2023 г. вновь происходит снижение величины недопоставки ЭЭ – 11,45 % (75,4936 тыс. кВт·ч.).

Показанная на рис. 1 динамика аварийных отключений не дает представления о том, какой интенсивностью обладают эти отказы, т.е. какое количество ЭЭ в результате этих повреждений недополучает потребитель. Для создания полной картины о представленных аварийных повреждениях рассмотрим структуру их интенсивности, основываясь на классификации, данной в [4,12–15].

Основываясь на принципах этой классификации, все количество отказов можно разделить на: $N_{<1}$ – отказы, повлекшие недоотпуск ЭЭ менее 1 тыс. кВт·ч.; N_{1-10} – отказы, в результате которых недоотпуск ЭЭ составил от 1 до 10 тыс., и $N_{>10}$ – отказы, вследствие которых возник недоотпуск ЭЭ от 1 до более 10 тыс. кВт·ч. Кроме того, имеют место также и самовосстанавливающиеся отказы – $N_{АПВ}$, которые самоликвидируются посредством срабатывания автоматики повторного включения, при этом недоотпуска ЭЭ не происходит. На рис. 3 представлены диаграммы таких отказов.

Общее количество отказов, не вызвавших последствий недоотпуска ЭЭ ($N_{АПВ}$ - отказы) (рис. 3в), за весь период наблюдения составило 414 шт. (3,43 % всех отказов), причем наибольшее количество таких отключений соответствует 2021 г. – 22,95 % (95 отк.) всего количества от $N_{АПВ}$, наименьшее – 2020 г. – 12,08 % (50 отк.). При этом наибольшее количество таких отключений (самовосстанавливающихся посредством автоматики повторного включения) приходится на июль (17,63 %) и июнь (13,29 %) месяцы, а наименьшее соответствует январю – 3,4 % (14 отк.).

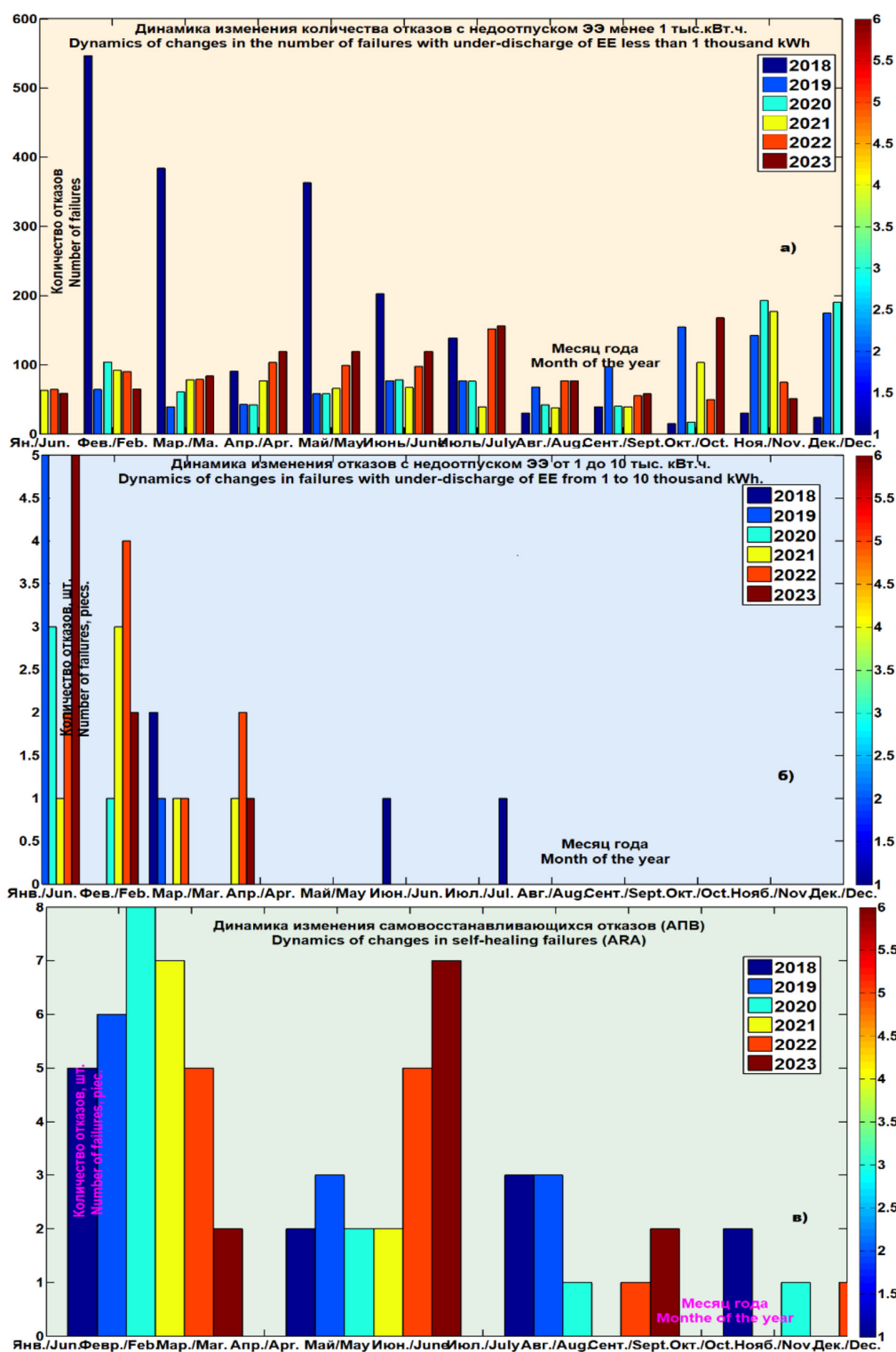


Рис. 3. Динамика изменения количества отказов в электрических сетях МЭ: а) с недоотпуском ЭЭ менее 1 тыс. кВт.ч.; б) с недоотпуском от 1 до 10 тыс. кВт.ч.; в) самовосстанавливающиеся отказы

Fig. 3. Dynamics of changes in the number of failures in electrical power supply networks: а) with an under-discharge of less than 1 thousand kWh; б) with a non-discharge of 1 to 10 thousand kWh; в) self-healing failures

Безусловно, в подавляющем большинстве случаев такие отказы случаются при значительной ветровой нагрузке, при которой происходит схлест фазных проводников. Либо подобное может происходить при перекрытии изоляции птичьим пометом. В любом случае такие отказы не несут недопоставки ЭЭ потребителям.

Наибольшее количество приходится на долю $N_{<1}$ - отказов (рис. 3а), в результате которых недоотпуск ЭЭ не превышает 1 тыс. кВт·ч. (рис. 3б). На долю таких отказов приходится 93,47 % (7130 отк.) всего количества отказов за исследуемый период, при этом количество недопоставленной ЭЭ в результате этих отказов составило 445,497 тыс. кВт·ч. Как показывает анализ рис. 3б и 3г, количество отказов N_{1-10} – типа составляет всего 1,1 % (84 отк.), тем не менее они привели к недоотпуску 19,84 % (130,743 тыс. кВт·ч.) от всего объема недопоставки ЭЭ в результате отказов всех типов. При этом наибольший недоотпуск ЭЭ в результате таких отказов происходил в 2018 г. (37,26 %) и в 2021 г. (24,4 %), то есть более 60 % недоотпуска пришлось на эти два года.

Отказы высокой интенсивности ($N_{>10}$) на рис. 3 не представлены. Они составляют 0,079 % (6 отк.) от всего количества отказов. Тем не менее на их долю приходится 7,9 % всего недоотпуска ЭЭ (52,09 тыс. кВт·ч.).

Рассмотрение основных причин произошедших событий отказов осуществлялось в соответствии с [18]. Произведенный анализ позволил установить следующее. Наибольшее количество аварийных отключений произошло по причине несоблюдения правил технического обслуживания (несвоевременное выявление и устранение дефектов – 1-я группа, рис. 4а). Отказы этого типа составляют 72,81 % (5554 отк.) от всего количества отказов. Второе место занимают отказы, связанные с превышением параметров воздействия стихийных явлений относительно условий проекта (6-я группа причин, рис. 4б). Эти отказы приводят к внешним механическим воздействиям на элементы электрической сети и оборудования (пререхлест проводов воздушных линий электропередачи, разрушение конструкций подстанционного оборудования, падение опор и обрыв ЛЭП). Такие отказы составили 8,78 % (670 отк.) всего количества аварийных отключений.

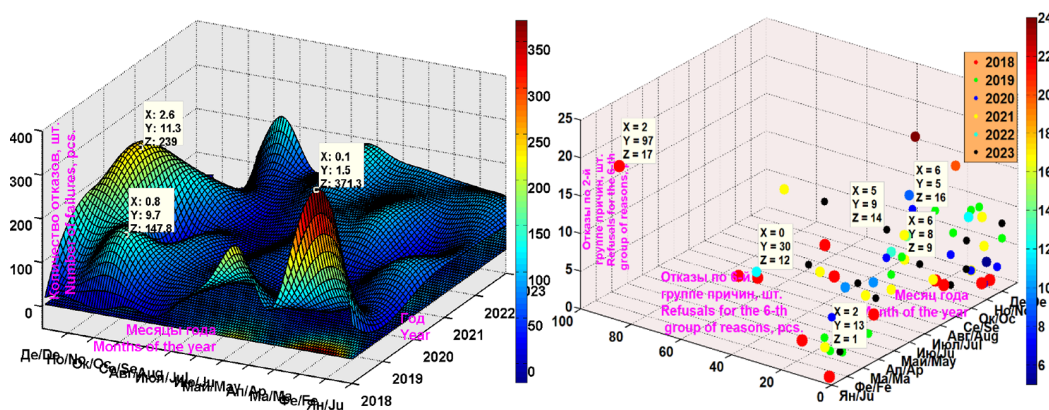


Рис. 4. Временные диаграммы изменения отказов в электрических сетях МЭ: а) по 1-й группе причин; б) по 6-й и 2-й группам причин

Fig. 4. Time diagrams of the failures change in the ME electrical networks: а) for the 1-st group of the reasons; б) for the 6-st and 2-th groups of the reasons

На 3 месте в сетях МЭ отказы по 2-ой группе причин, связанных с непредвиденным внешним воздействием (наезд крупногабаритной техники, наброс посторонних предметов на ВЛ и проч.), – 7,83 % (597 отк. – рис. 46). Аварийные отключения по другим причинам (рис. 5) распределены следующим образом: 4-я группа причин, связанных с воздействием на электроустановки птиц и животных (приводящих к загрязнениям), попаданием в электроустановки посторонних предметов (рис. 5б), – 4,2 % (320 отк.); 3-я группа причин, обусловленных в основ-

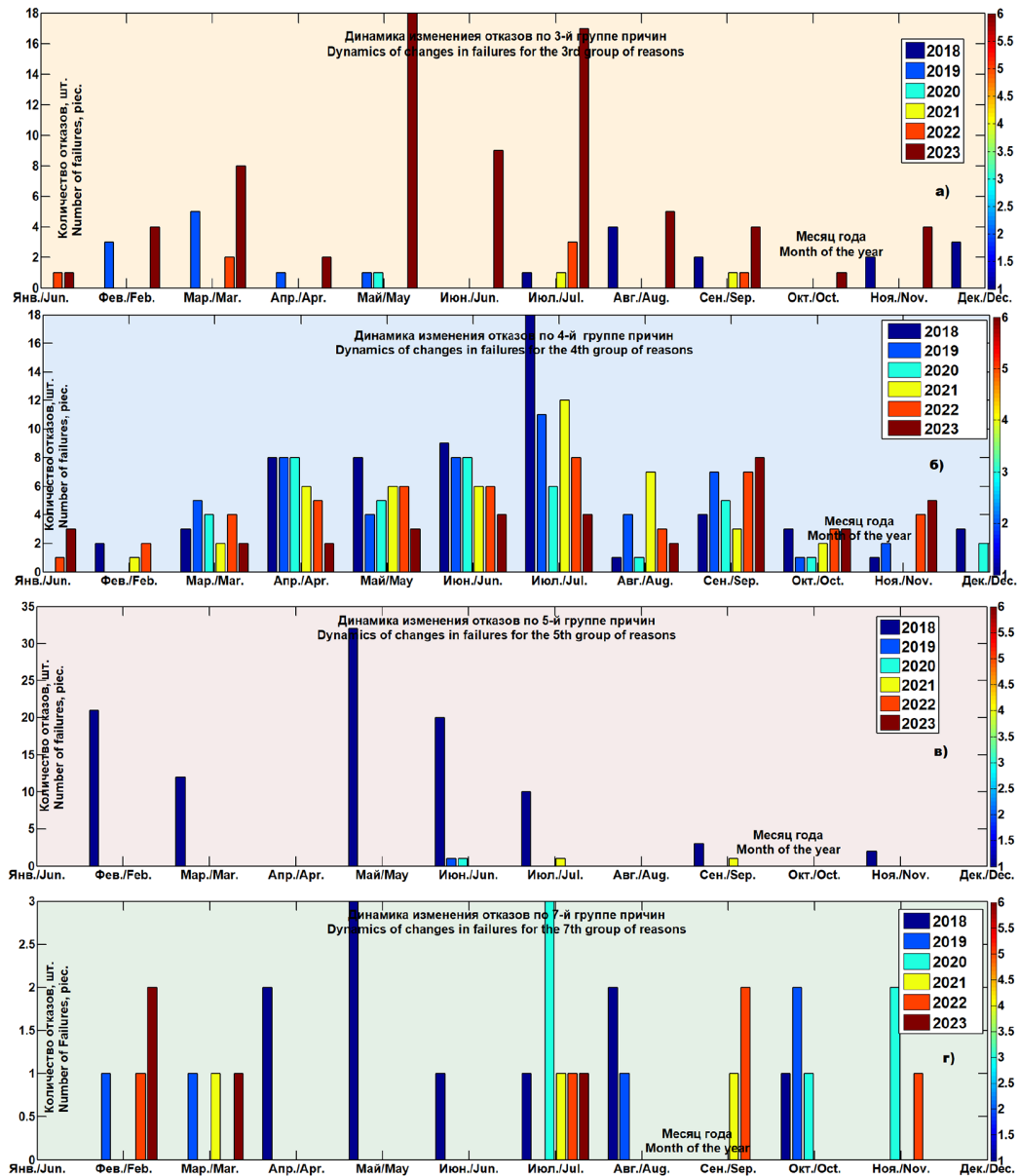


Рис. 5. Динамика изменения количества отказов по группам причин: а) 3 группа, б) 4 группа, в) 5 группа, г) 7 группа

Fig. 5. Dynamics of changes in the number of failures by reason groups: а) group 3, б) group 4, в) group 5, г) group 7

ном повреждениями в электрических сетях потребителей, – 1,73 % (132 отк.), рис. 5а; 5-я группа – причины, связанные с превышением параметров воздействия стихийных явлений (приводящие к разрывам цепей, нарушению электрической изоляции), – 1,66 % (127 отк.), рис. 5в, и 7-я группа, связанная с недостатками конструкций электроустановок, – 0,67 % (51 отк.), рис. 5 г.

Кроме того, в исследуемых электрических сетях есть еще одна группа причин повреждений, которые проявлялись в основном в 2018 г. и один раз в январе 2023 г. (на рис. 4 отсутствуют). Это отказы, причина которых не установлена (не выявленные причины). Эти отказы в общем объеме аварийных отключений составили 2,32 % (177 отк.). При этом 174 из них пришлось на 2018 г. Возникает сомнение в уровне квалификации персонала, занимающегося установлением причин повреждений в этом году, поскольку в таком количестве неустановленных причин быть не может.

Превентивная оценка аварийных ситуаций в электрических сетях МЭ

Как уже упоминалось ранее, задачей создания прогнозных моделей для оценки аварийных событий в сетях на определенную перспективу является разработка на их основе действенных противоаварийных мероприятий. При этом выбор математических моделей прогноза из предустановленного набора стандартных моделей во многом определяется степенью случайности показателя или его коэффициентом автокорреляции [12–15]. В тех случаях, когда связь в рядах исследуемых показателей проявляется как слабая или незначимая (коэффициент автокорреляции составляет менее 0,7), для вероятностной оценки можно использовать законы распределения вероятностей. Если же внутрирядная связь является значительно выраженной, то применяют авторегрессионную модель превентивной оценки событий отказа.

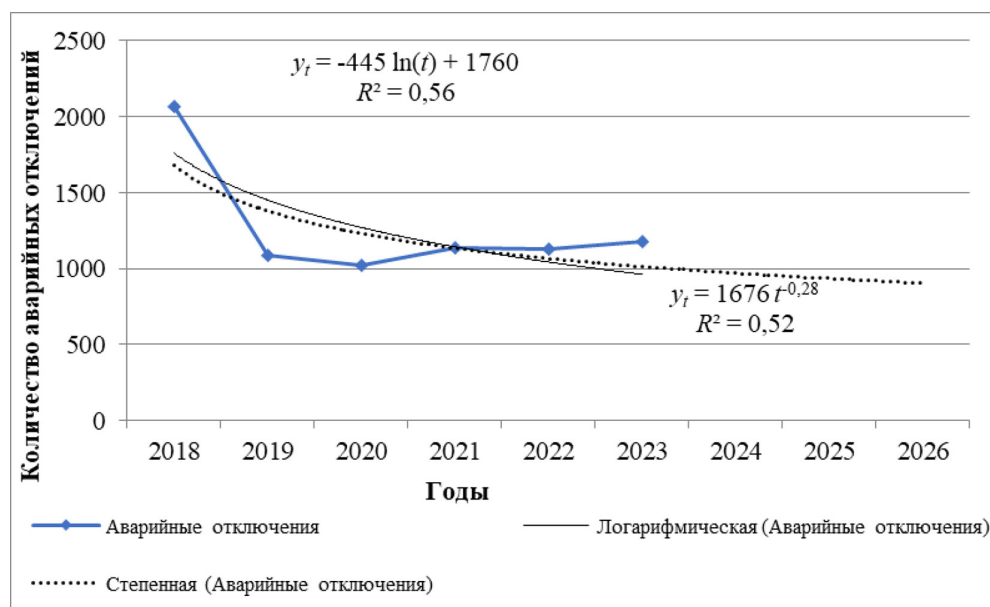


Рис. 6. Тренды годовых значений аварийных отключений в электрических сетях МЭ за 2018–2023 гг.

Fig. 6. Trends in the annual values of emergency shutdowns in the electrical networks of the ME 2018–2023

В нашем случае для превентивной оценки аварийности в электрических сетях МЭ в качестве исходных данных принята информация о количестве отказов по месяцам за период с 2018 по 2023 гг. (рис. 1). На основании произведенного анализа полученных данных и использования технологий Microsoft Excel построены тренды динамического развития аварийных отключений (рис. 6). Из множества линейных и нелинейных уравнений, используемых для формирования регрессионной зависимости, наиболее точной оказалась степенная модель, согласно которой к 2026 г. количество аварийных отключений должно сократиться до 904 в год.

Поскольку сезонные изменения климатических условий существенно влияют на количество и характер возникающих отказов, наиболее интересными являются модели, разработанные для прогнозирования аварийных отключений по месяцам. В табл. 1 представлены нелинейные (степенные, экспоненциальные, логарифмические и полиномиальные) трендовые уравнения, отражающие тенденции рядов исследуемого параметра по месяцам в рамках исследуемого периода с 2019 по 2023 гг. 2018 г. исключен из общего ряда, поскольку в этот период число аварий почти в 2 раза превышает последующие, и создается впечатление о недостаточно квалифицированном подходе к анализу аварийных ситуаций в этом году.

Важно отметить, что уравнение, рассчитанное по данным за август месяц, оказалось незначимым в соответствии с критерием Фишера. Значимость коэффициентов уравнений была оценена с использованием критерия Стьюдента [19]. В результате анализа выявлено, что количество аварий в электрических сетях по месяцам имеет разную тенденцию. В частности, число отказов оборудования в весенний и летний периоды, а также в январе возрастает, а в остальные месяцы снижается. Увеличение аварий может быть связано с неблагоприятными метеорологическими явлениями (ветровой нагрузкой, обледенением и пр.) и увеличением нагрузки на сеть (особенно в январе), а снижение событий отказа, вероятнее всего, связано с эффективным проведением профилактических мероприятий.

Таблица 1. Тренды аварийных отключений по месяцам в сетях МЭ за 2019–2023 гг.

Table 1. Trends of emergency outages by month in networks for 2019–2023

Месяц	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации (R^2)
Январь	$y_t = 21 \ln(t) + 38$	0,73
Февраль	$y_t = -8,6 t^2 + 59 t + 28$	0,85
Март	$y_t = 29 \ln(t) + 44$	0,98
Апрель	$y_t = 41 t^{0,66}$	0,84
Май	$y_t = 48e^{0,19}$	0,93
Июнь	$y_t = 4,4 t^2 - 17 t + 100$	0,92
Июль	$y_t = 59e^{0,22t}$	0,66
Сентябрь	$y_t = 11 t^2 - 72 t + 161$	0,80
Октябрь	$y_t = 27 t^2 - 155 t + 271$	0,62
Ноябрь	$y_t = 275 e^{-0,29t}$	0,66
Декабрь	$y_t = -20 t^2 + 83 t + 117$	0,98

Таблица 2. Авторегрессионные модели аварийных отключений в электрических сетях МЭ за 2019–2023 гг.

Table 2. Autoregressive models of emergency shutdowns in MES electrical networks for 2019–2023

Месяц	Авторегрессионное уравнение	R^2
Январь	$y_t = 0,014 y_{t-1}^2 - 1,3 y_{t-1} + 91$	0,50
Февраль	$y_t = 0,058 y_{t-1}^2 - 10 y_{t-1} + 535$	0,64
Март	$y_t = 12 y_{t-1}^{0,46}$	0,91
Апрель	$y_t = 70 \ln(y_{t-1}) - 203$	0,76
Май	$y_t = 95 \ln(y_{t-1}) - 319$	0,82
Июнь	$y_t = 0,23 y_{t-1}^2 - 42 y_{t-1} + 2044$	0,99
Июль	$y_t = 0,097 y_{t-1}^2 - 23 y_{t-1} + 1339$	0,99
Август	$y_t = 0,10 y_{t-1}^2 - 12 y_{t-1} + 444$	0,56
Октябрь	$y_t = 212 e^{-0,014} y^{*-1}$	0,80
Декабрь	$y_t = -0,095 y_{t-1}^2 + 31 y_{t-1} - 2296$	0,92

Помимо трендовых в прогнозировании применяются авторегрессионные уравнения, отражающие зависимость последующих значений ряда от предыдущих [20, 21]. Оценка коэффициентов автокорреляции (R_1) рядов исследуемого параметра по месяцам за период 2019–2023 гг. показала наличие в них сильной значимой внутрирядной связи ($R_1 > 0,7$) за исключением сентября и декабря, что позволяет строить авторегрессионные модели.

В табл. 2 приведены значимые нелинейные (полиномиальные, логарифмические, степенные, экспоненциальные) авторегрессионные уравнения для 10 месяцев. Представленные уравнения могут использоваться для прогнозирования исследуемого показателя. Однако, ввиду небольшой выборки, ошибка прогноза может быть достаточно значимой.

Поскольку отказы оборудования изменяются в зависимости от месяца, помимо описанных выше моделей для их прогнозирования можно использовать и тренд-сезонные модели. Одним из методов выделения составляющих временных рядов является метод наименьших квадратов, реализованный в модели «Кассандра» [22]. Суть метода заключается в выделении из исходного ряда x_t трех составляющих: тренда y_t , сезонных колебаний s_t и остаточного члена ε_t :

$$x_t = y_t + s_t + \varepsilon_t, t = 1, \dots, T. \quad (1)$$

При построении тренд-сезонной модели для ряда аварийных отключений в электрических сетях МЭ задавались следующие значения параметров: степень полинома тренда – 2, степень полинома сезонных колебаний – 1, количество периодов (месяцев) – 12, число значений ряда – 60.

На рис. 7 приведены графики динамики аварийных отключений в сетях МЭ за 2019–2023 гг. и их значения, рассчитанные по тренд-сезонной модели. В рассматриваемом периоде аварийные отключения в целом имеют тенденцию к снижению. Рассчитанный индекс сезонности свидетельствует о повышении числа аварий в июне, июле, октябре, ноябре и декабре (рис. 7). Кроме того, учитывая, что в некоторые месяцы расхождение между исходными и спрогнозированными данными значительно, можно сказать, что помимо сезонности на аварийность оказывают влияние и другие факторы.

Для определения моделей, наиболее точно прогнозирующих число отказов оборудования, помимо проверки полученных зависимостей на точность и адекватность используется ретроспективный прогноз, то есть прогноз на прошедший период. В табл. 3 приведены отклонения



Рис. 7. Динамика аварийных отключений в сетях МЭ за 2019–2023 гг. и сумма тренда и сезонных колебаний, выделенных в тренд-сезонной модели

Fig. 7. Dynamics of emergency shutdowns in ME networks in 2019–2023 and the sum of trend and seasonal fluctuations highlighted in the trend-seasonal model

Таблица 3. Отклонение значений ретроспективного прогноза аварийных отключений в электрических сетях МЭ на 2023 г. от фактических данных

Table 3. Deviation of the values of the retrospective forecast of emergency shutdowns in ME electrical networks in 2023 from the actual data

Месяц	Отклонение значения ретроспективного прогноза от фактического, %		
	трендовая модель	тренд-сезонная модель	авторегрессионная модель
Январь	9,6	11,0	0,1
Февраль	2,2	19,1	14,4
Март	1,9	6,4	2,2
Апрель	5,8	1,9	0,1
Май	0,8	1,8	0,7
Июнь	0,6	5,8	0,01
Июль	3,2	1,2	0,7
Август	-	5,7	0,9
Сентябрь	11,4	24,6	-
Октябрь	2,5	49,2	42,4
Ноябрь	22,7	26,0	-
Декабрь	6,2	60,6	0,7

значений ретроспективного прогноза, рассчитанных с помощью трендовой, авторегрессионной и тренд-сезонной моделей от фактических данных количества аварийных отключений.

В соответствии с произведенными расчетами, приведенными в табл. 3, отклонения ретроспективного прогноза, рассчитанные по трендовой модели, от фактических данных имеют приемлемые значения за исключением ноября. Авторегрессионная модель также может быть использована в большинстве случаев, кроме февраля и октября. Наихудший результат показала тренд-сезонная модель, которую нельзя использовать для прогнозирования аварийных отключений в феврале, сентябре-декабре.

Анализ причин аварийных отключений в сетях МЭ показал, что основной причиной отказов в электрических сетях является несоблюдение сроков, невыполнение в требуемых объемах технического обслуживания, диагностирования или ремонта оборудования и устройств, а также воздействие посторонних лиц и организаций, не участвующих в технологическом процессе (1-я и 6-я группы причин). Поскольку аварийные отключения из-за внешнего воздействия происходят не каждый месяц, можно сказать, что они носят случайный характер. Рассмотрим возможность прогнозирования аварийных отключений по причине несвоевременного технического обслуживания.

На первом этапе по годовым значениям аварийных отключений построен логарифмический и степенной тренды (рис. 8). При этом более высокий коэффициент детерминации имеет место у полиномиальной зависимости, согласно которой за 3 года количество отказов увеличится до 1300, что не соответствует действительности, поскольку в целом наблюдается тенденция уменьшения аварийных отключений. Согласно степенной зависимости количество аварий снизится до 733, а по логарифмической – до 691.

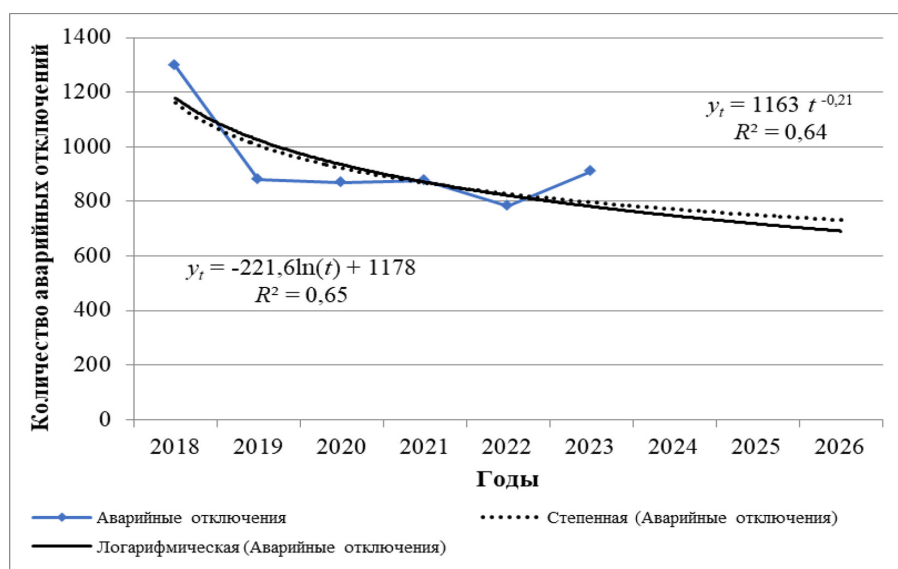


Рис. 8. Тренды годовых значений аварийных отключений из-за несоблюдения сроков технического обслуживания в сетях МЭ за 2018–2023 гг.

Fig. 8. Trends in annual values of emergency shutdowns due to non-compliance with maintenance deadlines in Mordovenergo's networks for 2018–2023

Таблица 4. Тренды аварийных отключений из-за несоблюдения сроков технического обслуживания по месяцам в сетях МЭ за 2019–2023 гг.

Table 4. Trends of emergency shutdowns due to non-compliance with maintenance deadlines by month in Maz networks 2019–2023

Месяц	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации (R^2)
Март	$y_t = 25,1 \ln(t) + 22,99$	0,57
Апрель	$y_t = 43,9 \ln(t) + 20,614$	0,66
Май	$y_t = 34,0 \ln(t) + 36,247$	0,80
Июнь	$y_t = 48,5e^{0,14t}$	0,85
Июль	$y_t = 9,6 t^2 - 39 t + 85$	0,90
Август	$y_t = 9,3 t^2 - 49 t + 97$	0,82
Сентябрь	$y_t = 6,7t^2 - 52 t + 138$	0,83
Октябрь	$y_t = 23,2 t^2 - 133 t + 232$	0,60
Декабрь	$y_t = -99 \ln(t) + 212$	0,71

На следующем этапе рассмотрим возможность прогнозирования количества возникающих отказов из-за несоблюдения сроков технического обслуживания по месяцам. При построении трендов данные за 2018 г. не использовались, поскольку число аварий за этот год в некоторые месяцы в несколько раз превышает значения последующих годов.

В результате моделирования аварийных отключений из-за несоблюдения сроков технического обслуживания по месяцам за 2019–2023 гг. получены логарифмические, полиномиальные и степенные тренды (табл. 4). При этом согласно критерию Фишера уравнения, полученные по данным апреля, июля, августа, октября и декабря, являются незначимыми и не могут быть использованы для прогнозирования.

Оценка коэффициентов автокорреляции исследуемых рядов показала наличие в некоторых из них сильной значимой внутрирядной связи, что позволяет строить авторегрессионные модели.

В табл. 5 приведены полученные нелинейные авторегрессионные зависимости, представленные в основном полиномиальными уравнениями. При этом из представленных уравнений только 3 могут использоваться для прогнозирования: экспоненциальное – для февраля, степенное – для октября и полиномиальное – для декабря. Остальные уравнения оказались незначимыми.

При построении тренд-сезонной модели для ряда аварийных отключений из-за несоблюдения сроков технического обслуживания в электрических сетях МЭ значения параметров задавались аналогично примеру, описанному выше.

На рис. 9 представлена динамика изменения фактических аварийных отключений по причине несоблюдения сроков технического обслуживания и значения, рассчитанные по тренд-сезонной модели. Из рисунка следует, что практически во все месяцы рассматриваемого периода имеет место значительное расхождение между исходными и спрогнозированными данными. Ошибка полученных прогнозов также является высокой, в связи с чем данная модель не может использоваться для прогнозирования исследуемого показателя.

Таблица 5. Авторегрессионные модели аварийных отключений из-за несоблюдения сроков технического обслуживания в электрических сетях МЭ за 2019–2023 гг.

Table 5. Autoregressive models of emergency shutdowns due to non-compliance with maintenance deadlines in ME electrical networks for 2019–2023.

Месяц	Авторегрессионное уравнение	R^2
Февраль	$y_t = 150e^{-0,014 y_{t-1}}$	0,82
Март	$y_t = 0,11 y_{t-1}^2 - 9,3 y_{t-1} + 222$	0,85
Апрель	$y_t = 0,20 y_{t-1}^2 - 22,5 y_{t-1} + 502$	0,9
Май	$y_t = 1,02 y_{t-1}^2 - 129,2 y_{t-1} + 3702$	0,98
Июль	$y_t = 0,09 y_{t-1}^2 - 12,2 y_{t-1} + 437$	0,94
Август	$y_t = 0,14 y_{t-1}^2 - 11,8 y_{t-1} + 255$	0,79
Сентябрь	$y_t = 0,05 y_{t-1}^2 - 5,6 y_{t-1} + 172$	0,62
Октябрь	$y_t = 1372 y_{t-1}^{-0,79}$	0,57
Декабрь	$y_t = 0,0004 y_{t-1}^{2,46}$	0,96



Рис. 9. Динамика аварийных отключений из-за несоблюдения сроков технического обслуживания в сетях МЭ за 2018–2023 гг. и сумма тренда и сезонных колебаний, выделенных в тренд-сезонной модели

Fig. 9. Dynamics of emergency shutdowns due to non-compliance with maintenance deadlines in ME networks for 2018–2023 and the sum of trend and seasonal fluctuations highlighted in the trend-seasonal model

Таким образом, для прогнозирования числа отказов оборудования из-за несоблюдения сроков технического обслуживания можно использовать тренды – для марта, мая, июня и сентября; авторегрессионные модели – для февраля, октября и декабря. При этом тренд-сезонная модель для получения прогнозов событий отказов по этой причине не может быть использована.

Заключение

Подводя итог представленным исследованиям, можно сформулировать следующие выводы:

- 1) аварийность в электрических сетях компании «Мордовэнерго» весьма велика – удельная аварийность в сетях компании составляет 0,4 отказа на 1 км длины ЛЭП. Это происходит в основном потому, что доля оборудования и линий электропередачи компании со сверхнормативным сроком службы составляет 69,99 % и 63,6 % соответственно;
- 2) наибольшее количество аварийных отключений приходится на долю отказов, в результате которых недоотпуск ЭЭ не превышает 1 тыс. кВт·ч. На долю таких отказов приходится 93,47 % (7130 отк.) всего количества отказов за исследуемый период, при этом количество недопоставленной ЭЭ в результате этих отказов составило 445,497 тыс. кВт·ч. Отказы высокой интенсивности, в результате которых перерыв электроснабжения составил более 10 тыс. кВт·ч., составляют всего 0,079 % всего количества отказов. Тем не менее на их долю приходится 7,9 % всего недоотпуска ЭЭ (52,09 тыс. кВт·ч.);
- 3) основными причинами аварийных отключений являются: несоблюдение правил технического обслуживания (несвоевременное выявление и устранение дефектов – 72,81 % (5554 отк.) от всего количества отказов и отказы, связанные с превышением параметров воздействия стихийных явлений относительно условий проекта – 8,78 % (670 отк.) всего количества аварийных отключений;
- 4) для превентивной оценки и построения трендов динамического развития аварийных отключений наиболее точной оказалась степенная модель, согласно которой к 2026 г. количество аварийных отключений должно сократиться до 904 в год;
- 5) получены авторегрессионные уравнения для 10 месяцев 2026 г., которые могут использоваться для прогнозирования аварийных отключений;
- 6) получены значения отклонения данных ретроспективного прогноза аварийных отключений в электрических сетях МЭ на 2023 г. от фактических данных, позволившие определить, что наиболее приемлемыми моделями прогнозирования отказов по сезонам года служат трендовая и авторегрессионная модели;
- 7) для прогнозирования числа отказов оборудования из-за несоблюдения сроков технического обслуживания можно использовать трендовые модели для марта, мая, июня и сентября; авторегрессионные модели – для февраля, октября и декабря. При этом тренд-сезонная модель для получения прогнозов событий отказов по этой причине не может быть использована.

Список литературы / References

- [1] *Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2021–2027 годы / Приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 88 от 26 февраля 2021 г.* [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/20706> (обращение: 30.03. 2025). [*On approval of the scheme and program for the development of the Unified Energy System of Russia for 2021–2027 / Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 88 dated February 26, 2021* [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/20706> (accessed: 30.03.2025) (in Rus.)].
- [2] *Коммерсантъ. России подствелили киловатты.* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7432006> (обращения: 30.03. 2025). [*Kommersant. Russia has been*

highlighted by kilowatts. [Electronic resource]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7432006> (accessed: 30.03.2025) (in Rus.).

[3] *Износ электросетевой структуры в России. Масштабы и перспективы*. [Электронный ресурс]. URL: <https://regnum.ru/article/2348996> (дата обращения: 30.03. 2025 г.). [Deterioration of the electric grid structure in Russia. Scope and prospects. [Electronic resource]. URL: <https://regnum.ru/article/2348996> (date of reference: 30.03.2025) (in Rus.)].

[4] Наумов И.В. Прогностическая оценка функционального состояния электрических сетей (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Самарские распределительные сети»). *Журн. Сиб. федер. ун-та «Техника и технологии»*, 2024, № 1 (17). С. 92–106. EDN: TURKE. [Naumov I. V. Prognostic assessment of the functional state of electrical networks (on the example of the branch of PJSC ROSSETI Volga – Samara Distribution Networks). *Journal of Siberian Federal University. University of Engineering and Technology*”, 2024, № 1 (17). Pp. 92–106. EN: TURKEY (in Rus.)].

[5] *ЭнергоНьюс. Проблема старения электросетевого комплекса России*. [Электронный ресурс]. URL: <https://energo-news.ru/archives/161370> (дата обращения: 30.03.2025). [*EnergoNews. The problem of aging of the Russian electric grid complex*. [Electronic resource]. URL: <https://energo-news.ru/archives/161370> (date of request: 30.03.2025) (in Rus.)].

[6] Белов С.И., Петров П.С. Прогнозирование аварийных отключений в электрических сетях 35–220 кВ. *Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина* 2017, № 4(80). С. 77–82. [Belov S.I., Petrov P.S. Forecasting emergency shutdowns in 35–220 kV electrical networks. *Bulletin of MGAU named after V.P. Goryachkin*, 2017, No. 4(80). Pp.77–82 (in Rus.)].

[7] Волошин А.А. Прогнозирование технического состояния оборудования и управление стабильности энергосистемы при помощи технологии интернета вещей для мониторинга в электрических сетях низкого напряжения / А.А. Волошин и др. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2017. 12. С. 128–134. [Voloshin, A.A. Forecasting the technical condition of equipment and managing the stability of the power system using Internet of Things technology for monitoring in low-voltage electric networks / A. A. Voloshin. et al. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2017, 12, pp. 128–134 (in Rus.)].

[8] Vorob'ev N. P., Mozol V.I. & Shanygin I. A. A Method for Assessing the Risk of Accidents in 10/0.4-kV Electrical Networks. *Springer Nature Link* 2019, Vol. 89 pp. 722–727.

[9] Мохов А.А. Диагностика и мониторинг электрических сетей как основа для прогнозирования отказов оборудования. *Символ науки: международный научный журнал*. 2021; (8) 2: 12–14. [Mokhov A.A. Diagnostics and monitoring of electrical networks as a basis for predicting equipment failures. *Symbol of Science: international Scientific Journal*. 2021; (8) 2: 12–14 (in Rus.)].

[10] Дубяго М.Н. Методы диагностики и прогнозирования остаточного ресурса кабельных линий в распределительных электрических сетях 6–10 кВ. *Дисс. на соис. уч. степени канд. техн. наук* 2021; 216 С. [Dubyago M.N. Methods of diagnostics and forecasting of the residual resource of cable lines in 6–10 kV distribution electric networks. *Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences* 2021; 216 p. (in Rus.)].

equipment failures / *Symbol of Science: international Scientific Journal*. 2021; (8) 2: 12–14].

[11] Карамов Д.Н. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети 10 кВ автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией /Д.Н. Карамов, И.В. Наумов, С.М. Пержабинский. *Известия Томского политехнического универ-*

система. *Инжиниринг георесурсов* 2018; (7): 116–130. [Karamov D.N. Mathematical modeling of failures of 10 kV electric grid elements of autonomous energy systems with renewable distributed generation /D.N. Karamov, I.V. Naumov, S.M. Perzhabinsky. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering* 2018; (7): 116–130 (in Rus.)].

[12] Наумов И. В., Полковская М. Н. О возможности превентивных оценок повреждаемости электрических сетей (на примере ПАО Россети Ленэнерго). *Надежность и безопасность энергетики*. 2022 г. Т. 15.-№ 2. С. 72–80. DOI: 10.24223/1999–5555–2022–15–2–72–80. [Naumov I. V., Polyakovskaya M.N. On the possibility of preventive assessments of damage to electrical networks (using the example of PJSC ROSSETI Lenenergo). *Reliability and safety of energy*. 2022, vol. 15, No. 2, pp. 72–80. DOI: 10.24223/1999–5555–2022–15–2–72–80 (in Rus.)].

[13] Наумов И. В. Прогностические модели надежности передачи электрической энергии (на примере АО «Тываэнерго»). *Надёжность*. 2023. Т. 23, № 4. С. 31–38. [Naumov I. V. Predictive models of reliability of electric power transmission (using JSC Tyvaenergo as an example). *Reliability*. 2023. Vol. 23, No. 4. pp. 31–38 (in Rus.)].

[14] Наумов И. В. Прогностическая оценка функционального состояния электрических сетей (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Самарские распределительные сети». *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2024, Т. 17, № 1. – С. 92–106. [Naumov I. V. Prognostic assessment of the functional state of electrical networks (on the example of the branch of PJSC ROSSETI Volga – Samara Distribution Networks. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2024, vol. 17, No. 1, pp. 92–106 (in Rus.)].

[15] Наумов И. В. Перспективная оценка надежности функционирования электрических сетей на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Саратовские распределительные сети». *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2024. Т. 17, № 3. С. 360–377. [Naumov I. V. Perspective assessment of the reliability of electrical networks using the example of the branch of PJSC ROSSETI Volga – Saratov Distribution Networks. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2024. Vol.17, No. 3. pp. 360–377 (in Rus.)].

[16] *Постановление Правительства РФ от 21 января 2004 г. № 24 «Об утверждении стандартов раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии»*. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/186671/> (дата обращения: 30.03. 2025 г.). [Resolution of the Government of the Russian Federation dated January 21, 2004 No. 24 “On Approval of Information Disclosure Standards by Subjects of Wholesale and Retail Electric Energy Markets”. [Electronic resource]. URL: <https://base.garant.ru/186671/> (date of access: 30.03.2025) (in Rus.)].

[17] *Об основных потребительских характеристиках регулируемых товаров и услуг*. [Электронный ресурс].URL: https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart_raskritiya_informatsii_subektami_optovogo_i_rozничного_rinkov_elektricheskoy_energii/2024god/p19gobosno/ (дата обращения: 30.03. 2025 г.). [About the main consumer characteristics of regulated goods and services. [Electronic resource].URL: https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart_raskritiya_informatsii_subektami_optovogo_i_rozничного_rinkov_elektricheskoy_energii/2024god/p19gobosno/ (date of access: 30.03.2025) (in Rus.)].

[18] *Приказ Минэнерго России от 02.03.2010 N 90 (ред. от 27.07.2017): «Об утверждении формы акта о расследовании причин аварий в электроэнергетике и порядка ее заполнения» (вместе с «Порядком заполнения формы акта о расследовании причин аварий в электроэнерге-*

тике») (Зарегистрировано в Минюсте России 22.04.2010 N 16973. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902204848> (дата обращения: 26.02.2025). [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 03/02/2010 N 90 (as amended on 07/27/2017): “On approval of the form of the act on the investigation of the causes of accidents in the electric power industry and the procedure for filling it out” (together with the “Procedure for filling out the form of the act on the investigation of the causes of accidents in the Electric Power industry”) (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 22.04.2010 N 16973. [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902204848> (date of request: 02/26/2025) (in Rus.)].

[19] Иваньо Я. М., Наумов И. В., Полковская М. Н. Моделирование отказов элементов городской электрической сети 10 кВ на примере Правобережного округа г. Иркутска. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета* № 9 (2023), «Процессы и машины агроинженерных систем», 2021. С. 87–98. [Ivano Ya.M., Naumov I. V., Polyakovskaya M. N. Modeling of failures of elements of the 10 kV urban electric grid on the example of the Pravoberezhny district of Irkutsk. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, No. 9 (2023), “Processes and machines of agroengineering systems”, 2021. pp. 87–98 (in Rus.)].

[20] Ланин А. В. Статистический анализ аварийных отключений в электрических сетях 10кВ / А. В. Ланин, М. Н. Полковская, А. А. Якупов. *Актуальные вопросы аграрной науки*. 2019. № 30. С. 45–52. [Lanin, A. V. Statistical analysis of emergency shutdowns in 10 kV electrical networks / A. V. Lanin, M. N. Polyakovskaya, A. A. Yakupov. *Actual issues of agrarian science*. 2019. No. 30. pp. 45–52 (in Rus.)].

[21] Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. В 2 томах: Том 2. Анализ временных рядов и случайных полей. Издание 2, испр. и доп. СПб.: РГГМУ, 2020. 196 с. [Malinin V. N. Statistical methods of analysis of hydrometeorological information: textbook. In 2 volumes: Volume 2. Analysis of time series and random fields. Edition 2, ispr. and add. St. Petersburg: RGGMU, 2020. 196 p. (in Rus.)].

[22] Зоркальцев В. И. Аддитивная и мультипликативная модели выявления тренда и сезонных колебаний: приложение мультипликативной модели к динамике цен на сельскохозяйственную продукцию / В. И. Зоркальцев, М. Н. Полковская. *Управление большими системами: сборник трудов*. 2020. № 86. С. 98–115. DOI 10.25728/ubs.2020.86.4. [Zorkaltsev V. I., Polkovskaya M. N. Additive and multiplicative models for detecting trends and seasonal fluctuations: the application of a multiplicative model to the dynamics of prices for agricultural products / V. I. Zorkaltsev, M. N. Polkovskaya. *Management of large systems: proceedings*. 2020. No. 86. pp. 98–115. DOI 10.25728/ubs.2020.86.4 (in Rus.)].

EDN: TNKONH

УДК 621.311, 621.331

Application of Renewable Energy Sources in Railway Power Supply Systems of Direct Current

**Andrey V. Kryukov^{a, b}, Konstantin V. Suslov^{b, c},
Andrey G. Batuhin^d, Aleksandr V. Cherepanov^{a*},
Aleksandr E. Kryukov^b and Nguen K. Hieu^b**

*^aIrkutsk State Transport University
Irkutsk, Russian Federation*

*^bIrkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation*

*^cNational Research University «MPEI»
Moscow, Russian Federation*

*^dTransbaikal State University
Chita, Russian Federation*

Received 14.03.2025, received in revised form 04.04.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. Using renewable energy sources (RES) in power supply systems of rail transport (PSSRT) makes it possible to increase the reliability of energy supply for transportation processes, improve their energy efficiency and improve the quality indicators of electric power. Computer models of the power supply system of a section of a DC main railway were developed to obtain quantitative indicators characterizing the results of using RES. Wind farms, the capacity of which varied over time, were connected to the inputs of 10 kV traction substations. These models can be used to solve the following problems: assessing the impact of RES on the quality of electric power; determining the areas of their application in PSSRT; identifying the best places to place RES in networks. The results of digital modeling of PSSRT showed that the following positive effects are achieved due to VP: voltage supplied to electric locomotives increases by 1...2.5 %; coefficients at the inputs of 110 kV traction substations (TS) decrease by 60...64 %; harmonic coefficients are reduced by 2.6...2.8 times; average values of power losses in the main 110 kV transmission line are reduced by 2.4 times. Thus, the use of renewable energy sources makes it possible to stabilize voltages on electric locomotive current collectors, reduce asymmetry and non-sinusoidality levels on 110 kV TS buses, as well as electricity consumption from the EPS and electricity losses. Thus, the use of renewable energy sources makes it possible to stabilize voltages on electric locomotive current collectors, reduce asymmetry and non-sinusoidality levels on 110 kV TS buses, as well as electricity consumption from the electric power system (EPS) and electricity

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: smart_grid@mail.ru

losses. Thus, based on the integration of renewable energy sources into the RES, it is possible to increase energy efficiency indicators and improve the quality of electricity. Due to the reduction in electricity consumption from the EPS using thermal power plants, greenhouse gas emissions can be significantly reduced.

Keywords: DC railways, traction power supply systems, integration of renewable energy sources.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 123102000012–2), agreement No. 075–03–2023–028/1 dated 05.10.2023.

Citation: Kryukov A. V., Suslov K. V., Batuhin A. G., Cherepanov A. V., Kryukov A. E., Nguen K. Hieu. Application of Renewable Energy Sources in Railway Power Supply Systems of Direct Current. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 472–487. EDN: TNKONH



Применение возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения железных дорог постоянного тока

**А. В. Крюков^{а, б}, К. В. Суслов^{б, в}, А. Г. Батухтин^г,
А. В. Черепанов^а, А. Е. Крюков^б, Нгуен Куок Хиеу^б**

*^аИркутский государственный университет
путей сообщения*

Российская Федерация, Иркутск

*^бИркутский национальный исследовательский
технический университет*

Российская Федерация, Иркутск

^вНациональный исследовательский университет «МЭИ»

Российская Федерация, Москва

^гЗабайкальский государственный университет

Российская Федерация, Чита

Аннотация. На основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в системах электроснабжения железнодорожного транспорта (СЭЖТ) возможно повысить надежность энергообеспечения процессов перевозок и повысить их энергетическую эффективность, а также улучшить показатели качества электроэнергии. Для получения количественных показателей, характеризующих результаты применения ВИЭ, разработаны компьютерные модели системы электроснабжения участка магистральной железной дороги постоянного тока. К вводам 10 кВ тяговых подстанций подключались ветропарки, мощность которых изменялась во времени. С помощью этих моделей возможно решение следующих задач: оценка воздействия ВИЭ на качество электроэнергии; определение областей их применения в СЭЖТ; выявление мест наилучшего размещения ВИЭ в сетях. Результаты цифрового моделирования СЭЖТ показали, что за счет ВП достигаются следующие положительные эффекты: напряжения, подводимые к электровозам, увеличиваются на 1...2,5 %; коэффициенты k_{2U} на вводах 110 кВ тяговых подстанций (ТП) снижаются на 60...64 %; коэффициенты гармоник k_U уменьшаются в 2,6...2,8 раза; средние значения потерь мощности в головной ЛЭП 110 кВ понижаются в 2,4 раза. Таким образом, применение ВИЭ дает возможность стабилизировать напряжения на токоприемниках

электровозов, снизить уровни несимметрии и несинусоидальности на шинах 110 кВ ТП, а также электропотребление из электроэнергетической системы (ЭЭС) и потери электроэнергии. Таким образом, на основе интеграции ВИЭ в СЭЖТ можно повысить показатели энергоэффективности и улучшить качество электроэнергии. За счет снижения электропотребления из ЭЭС, использующей тепловые электростанции, могут быть заметно уменьшены выбросы парниковых газов.

Ключевые слова: железные дороги постоянного тока, системы тягового электроснабжения, интеграции возобновляемых источников энергии.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012–2), соглашение № 075–03–2023–028/1 от 05.10.2023 г.

Цитирование: Крюков А. В. Применение возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения железных дорог постоянного тока / А. В. Крюков, К. В. Сулов, А. Г. Батухтин, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков, Нгуен Куок Хиеу // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 472–487. EDN: TNKONH

Введение

Интеграция возобновляемых источников энергии в системы электроснабжения железнодорожного транспорта позволяет повысить надежность энергообеспечения процессов перевозок и повысить их энергетическую эффективность. Подходы к решению задачи рационального использования ВИЭ рассматриваются в большом числе публикаций. Так, например, анализ производительности гибридной тяговой сети с использованием возобновляемых источников энергии выполнен в [1]. В ней отмечается, что железные дороги Индии используют электрическую тягу на основе приводов постоянного тока локомотивов, питаемых от контактной сети 25 кВ. Однофазный переменный ток преобразуется в постоянный регулируемым выпрямителем. Из-за ограниченной доступности традиционных источников энергии и загрязнений окружающей среды при сжигании ископаемого топлива следует активно использовать возобновляемые источники. Предложена новая стратегия управления, ВИЭ сопряжены с СТЭ; при этом ВИЭ синхронизированы с питающей сетью, которая подает электроэнергию на локомотивы. Режимы СТЭ проанализированы с помощью моделирования и экспериментальных испытаний, проведенных на разработанной гибридной системе. Рассмотрены преимущества и ограничения предлагаемой конфигурации. Использованию возобновляемой энергии для повышения производительности индийской СТЭ посвящены статьи [2, 3]. В них подчеркивается, что недостаточная доступность традиционных источников и наличие выбросов углерода в атмосферу приводит к необходимости активного применения ВИЭ в качестве их замены. Предлагается использовать ветрогенераторы, связанные с сетью, от которой питаются ТП. Стратегия управления СТЭ с системой хранения энергии и возобновляемыми источниками предложена в [4]. Показано, что потребление энергии городскими железными дорогами резко увеличивается из-за растущего спроса на поездки. Эта ситуация создает большие проблемы для СТЭ. В результате проведенных авторами исследований предложена стратегия управления СТЭ, оснащенной накопителями энергии и ВИЭ. Создана подробная эквивалентная модель подвижного состава, тяговой сети и накопителей энергии (НЭ). Разработана стратегия управления, направленная на снижение пиковой мощности и отклонений напряжения. Исследование проведено для линии с многопоездной работой. Результаты моделирования показали, что предлагаемый подход может эффективно снизить пиковую мощность и отклонения напряжения. Исследованию токов короткого

замыкания (КЗ) в распределенной СТЭ с ВИЭ посвящена статья [5]. В ней проанализирован характер изменения токов КЗ при использовании ВИЭ. Выявлена тенденция увеличения доли ВИЭ в общем энергобалансе и рост электропотребления на магистральных железных дорогах. Цель исследований состояла в оценке влияния ВИЭ на значения токов КЗ. Разработанный метод основан на известных подходах к определению схем замещения, но пару типа «солнечная панель – инвертор» он воспроизводит как ЭДС с эквивалентным сопротивлением, что существенно упрощает дальнейшие расчеты. Результаты расчетов показали, что применение ВИЭ не приведет к существенному увеличению токов КЗ в ТС даже тогда, когда мощность фотоэлектрических источников будет сопоставима с мощностью существующих преобразовательных установок на тяговых подстанциях. Это обусловлено физической природой панелей и ее режимами их работы. Поэтому с точки зрения токов КЗ вполне возможна интеграция пунктов повышения мощности, питаемых от солнечных электростанций, с действующими участками СТЭ. Схема выбора ВИЭ на основе нейронной сети для вспомогательного питания нетяговых потребителей на основе ветра и солнца представлена в [6]. Предложена концепция электроснабжения вспомогательных нагрузок вагонов метрополитена с использованием ветро-солнечных ВИЭ. Существующие схемы выбора ВИЭ ориентированы на оборудование, что приводит к нечувствительности компонентов. Авторы используют подход на основе нейронной сети. Предлагаемый метод прост, малозатратен и точен. Обзор устойчивых СТЭ с микросетью выполнен в [7]. Приведен анализ современных СТЭ на железных дорогах постоянного и переменного токов. Рассмотрены различные архитектуры устойчивых СТЭ для интеграции возобновляемой энергии. Они гарантируют надежное электроснабжение в случае сбоев и отказов, например, в результате стихийных бедствий и экстремальных погодных условий. Такой подход помогает облегчить разработку СТЭ следующего поколения для повышения гибкости и устойчивости. На основе сравнительного анализа различных СТЭ приведена краткая характеристика будущих тенденций и сделан вывод о том, что предлагаемые СТЭ обеспечивают универсальное решение для интеграции ВИЭ и высококачественного электроснабжения с защитой от сетевых нарушений. Стратегия координированного управления СТЭ с накопителями энергии и ВИЭ описана в [8]. Отмечается, что под влиянием растущего спроса на поездки и расширения поселений задача создания систем городского железнодорожного транзита (ГЖТ) приобретает особую актуальность. Авторами на основе существующей тяговой подстанции предложена конфигурация многоисточниковой СТЭ для ГЖТ с координированной стратегией управления в соответствии с графиком нагрузки. Была смоделирована предлагаемая СТЭ, включающая традиционную ТС, ВИЭ и НЭ. С учетом динамических характеристик системы и емкости НЭ разработана координированная стратегия управления. Она рассматривает напряжение ТП как управляющий сигнал, который оптимизируется на основе предлагаемого индекса производительности. Исследования проведены на трехстанционном маршруте с двумя подстанциями. Предлагаемая СТЭ сравнивается с традиционной при различных графиках движения. Результаты моделирования показали, что предлагаемый подход обеспечивает поддержку заряда НЭ и снижает пиковые мощности ТП, а также колебания напряжения. Кроме того, возрастает пропускная способность ТС. Экономия энергии может достигать 36 %, а пиковая мощность уменьшается на 46 %. При решении задач интеграции ВИЭ в СТЭ требуется оценивать показатели несимметрии по обратной последовательности. Метод такой оценки предложен в [9]. Он учи-

тывает результаты тяговых расчетов, а также связи между СТЭ и питающей сетью. Представлена СТЭ, которая позволяет реализовать компенсацию токов обратной последовательности. Тяговые расчеты выполнялись для получения пространственных координат, скоростей и мощностей поездов в заданные моменты времени. Сформирована модель СТЭ для расчетов потоков мощности. Стратегия управления энергией для усовершенствованной СТЭ с фотоэлектрическими панелями (ФП) и электростанциями предложена в [10]. Такая СТЭ, интегрированная с ФП и НЭ, позволяет эффективно использовать энергию рекуперативного торможения и ВИЭ. Предлагается многомасштабная стратегия управления, включающая оптимальную поминутную диспетчеризацию для главной станции и посекундное управление в реальном времени для ТП. На уровне главной станции осуществляется минимизация эксплуатационных затрат для получения опорных рабочих точек преобразователя выходного порта, ФП и НЭ на каждой ТП. На уровне подстанции предлагается стратегия управления адаптивной рабочей точкой для обеспечения стабильности напряжения и частоты. Осуществимость и достоинства предлагаемой стратегии проверены с помощью моделирования и экспериментов. Вопросы интеграции ВИЭ и оптимизация НЭ для уменьшения энергозатрат на железных дорогах рассмотрены в [11]. Изменение климата является одной из крупнейших глобальных проблем. На транспортный сектор приходится около 30 % выбросов парниковых газов, которые необходимо декарбонизировать. Электрификация железных дорог является низкоуглеродным решением, но она использует электростанции, вызывающие выбросы углерода. Для декарбонизации можно использовать ВИЭ и НЭ. Авторами разработана система управления энергией для расчета ее потоков и стоимости. Кроме того, были рассмотрены потери в ТС и решена задача поиска оптимальных мощностей и местоположений фотоэлектрических и ветровых электростанций. Тяговая сеть высокоскоростной железной дороги была взята в качестве примера. Результаты показали, что стоимость и выбросы углерода значительно сокращаются при установке ВИЭ. При рассмотрении всех переменных выявлено, что применение ветровых электростанций является более экономичным вариантом, чем солнечных. Исследование также показало, что оптимальные места подключения ВИЭ различаются в зависимости от сценария. Разработке гибридного источника с солнечной панели, ветрогенератора и суперконденсаторов для тяги поездов посвящена статья [12]. В ней рассмотрены вопросы проектирования встроенного источника питания с использованием суперконденсаторов (СК), которые заряжаются с помощью солнечных панелей и имеют электронный преобразователь, питаемый от ветрогенератора. Эти СК обеспечивают питание электрической сети мощностью 60 кВт с применением управления скользящим режимом. Представлены принцип работы этого устройства и некоторые экспериментальные результаты. Новый однофазный инвертор с межфазным мостом для фотоэлектрических систем и накопителей энергии, подключенный к СТЭ, описан в [13]. Маршрутизатор предназначен для балансировки тяговой сети, использования энергии торможения и доступа к ВИЭ. Однако существующие технологии требуют высоких затрат. В статье предлагается новый маршрутизатор с межфазной мостовой однофазной инверторной структурой для реализации трехпортовой передачи энергии. Подробно проанализированы потоки мощности между тремя портами, и разработана математическая модель для количественного изучения передачи мощности между ними. Чтобы решить проблему трехпортовых взаимодействий активной и реактивной мощности, предложен гибридный метод развязки, основанный на дополнительных устройствах компенсации реактивной

мощности и алгоритме оптимизации. Функциональная эффективность и экономическое превосходство предлагаемого подхода проверены с помощью сравнительных экспериментов. Результаты динамического моделирования СТЭ постоянного тока с учетом устройств хранения энергии представлены в [14]. В статье рассмотрены модели различных частей СТЭ, включая накопители энергии – суперконденсаторы. При создании модели СК учитывались пороговые значения напряжения зарядки и разрядки. В сочетании с состояниями ТС подробно проанализирована стратегия управления СК. Динамическое моделирование основано на методе сокращения цепочек правил матриц лестничной цепи. Для сравнения эффектов энергосбережения и стабилизации напряжения задавались три условия установки оборудования: с тормозными резисторами, с СК, при отсутствии этих элементов. Программа моделирования реализована в Matlab. С ее помощью сравнивались и анализировались результаты определения режимов линии метро. Обзор технологий возобновляемых микросетей для электрифицированного транспорта представлен в [15]. Развитие транспорта с использованием ВИЭ приобретает в современных условиях особую актуальность. В статье рассматриваются возобновляемые микросети и технология энергетических маршрутизаторов. Интеграция таких микросетей с электрифицированной транспортной инфраструктурой обеспечивает повышенную надежность, улучшенное использование ВИЭ и оптимизированное управление энергией. Маршрутизаторы дополнительно обеспечивают гибкое распределение энергии. Таким образом, на основе ВИЭ создаются возможности реализации устойчивых и эффективных СТЭ. Перспектива использования солнечной энергии в железнодорожном транспорте Китая обсуждается в [16]. В современных условиях наблюдается быстрый рост грузовых и пассажирских перевозок, что сопровождается увеличением потребления электроэнергии. В настоящее время в качестве дополнительных источников широко используется солнечная генерация. В статье рассматривается ее текущее состояние и комплексное применение в транспортном секторе. Оценивается потенциал фотоэлектрической генерации для железных дорог Китая. Представлены перспективы реализации железнодорожных перевозок на солнечной энергии, которые способствуют снижению выбросов углерода и развитию ВИЭ. Подтверждено, что такой подход является многообещающим для устойчивой транспортировки. Интегрированная железнодорожная система и парковки для электромобилей с рекуперативной энергией торможения, системой накопления энергии и наличием фотоэлектрических систем описаны в [17]. Отмечается, что значительный прогресс в электрификации транспорта произошел в последние годы. Авторами предлагается новая концепция интеграции систем рельсового транспорта с парковками для электромобилей (ЭМ). В предлагаемой структуре потребность в зарядной мощности ЭМ удовлетворяется различными стратегиями, учитывающими неиспользуемую мощность энергетической инфраструктуры и рекуперативную энергию. Описан проект навеса для производства возобновляемой энергии на основе фотоэлектрических панелей для парковок ЭМ. Реализована оптимальная система управления с учетом неопределенности, связанной со спросом на зарядку ЭМ. Концепция протестирована и получены комплексные результаты. Задача распределения возобновляемой энергии в тяговых сетях легкорельсового транспорта решена в [18]. Электроприводный легкорельсовый транспорт рассматривается как экологически чистая устойчивая альтернатива общественному транспорту в густонаселенных районах. Однако источник энергии должен быть возобновляемым. Солнечные электростанции и модули на общественных зданиях в центре

города могут быть таким источником. Тяговые воздушные линии загружены только на 20 % своей мощности. Поэтому предлагается использовать их в качестве сети постоянного тока для распределения возобновляемой энергии. Достижения в области возобновляемой энергии для транспорта проанализированы в [19]. Основное внимание в этой статье уделено вопросам использования поездов, локомотивы которых получают энергию от солнечных батарей. Такой подход позволяет сократить выбросы парниковых газов и повысить показатели энергоэффективности. Вопросы оптимального использования фотоэлектрических систем для электрифицированных железных дорог и зарядных станций электромобилей рассмотрены в [20]. Интеграция ВИЭ в традиционные энергосистемы становится все более важной для достижения устойчивых энергетических решений. Требование такой интеграции имеет решающее значение в мегаполисах для сокращения выбросов углерода и затрат на электроэнергию. В статье изучена схема управления энергией для оптимального использования ФП для электрифицированных железных дорог и зарядных станций ЭМ. Система управления энергией разработана для определения приоритетов применения фотоэлектрической энергии, использует метод отслеживания точки максимальной мощности с алгоритмом возмущения и наблюдения. В случаях недостаточной фотоэлектрической мощности система плавно получает энергию из сети переменного тока через преобразователь для поддержания стабильного электроснабжения метрополитена и зарядной станции ЭМ. Когда генерация ФП превышает спрос, излишки энергии возвращаются в сеть переменного тока. Предложенный подход эффективно работает для бесперебойного управления зарядными станциями и электрифицированными железными дорогами; при этом значительно сокращаются выбросы углерода. Задача интеграции фотоэлектрических технологий в железнодорожные поезда решена в [21]. Показано, что СТЭ метро потребляет большое количество электроэнергии. Поэтому имеет место острая необходимость в использовании ВИЭ. Фотоэлектрическая технология может привести к значительному сокращению выбросов парниковых газов. В статье сделано технико-экономическое обоснование использования ФП для внутреннего освещения городских рельсовых транспортных средств. В статье рассмотрены вопросы применения ФП для их внутреннего освещения. Технологии интеграции ВИЭ на железнодорожных грузовых станциях в Южной Африке предложены в [22]. Миссия по улучшению технологий и сохранению окружающей среды с использованием микросетей на основе ВИЭ вызывает интерес во всем мире. Южноафриканская отрасль железнодорожных грузоперевозок все еще отстает в отношении технологий возобновляемой энергии на грузовых станциях. В статье проведены исследования эффективного метода подачи электроэнергии от гибридной системы возобновляемой энергии на грузовую станцию Salkor. Гибридная микросеть спроектирована с использованием ФП и ветряных турбин. Литий-ионные аккумуляторы будут обеспечивать хранение энергии. Выполнена оценка осуществимости, в ходе которой электрический генератор был включен в гибридную микросетевую систему с целью проверки жизнеспособности.

Из анализа рассмотренных публикаций можно сделать вывод о том, что задача использования ВИЭ на железнодорожном транспорте имеет несомненную актуальность. Однако проблема реализации эффективных технологий моделирования СТЭ, имеющих в своем составе ВИЭ, не решена в полном объеме. Особую значимость этот вопрос приобретает для СТЭ постоянного тока. Ниже предлагается комплексный подход к этой проблеме, для решения которой используются алгоритмы, представленные в [23–25].

Методика моделирования

Общая структура модели сети с сегментами переменного (AC) и постоянного (DC) токов показана на рис. 1. Алгоритмы определения параметров выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), которые в общем случае изменяются во времени, и расчетные соотношения приведены в [25, 26].

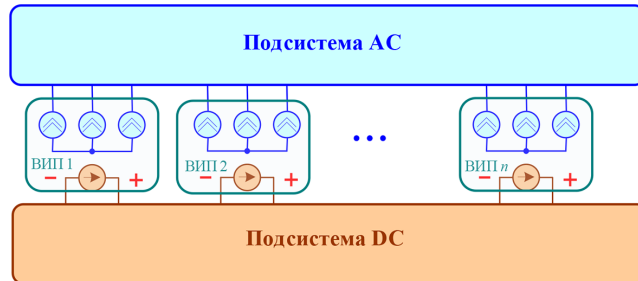


Рис. 1. Структурная схема модели сети с сегментами AC и DC

Fig. 1. Structural diagram of the network model with AC and DC segments



Рис. 2. Блок-схем алгоритма расчета режима

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for calculating the mode

Моделирование осуществлялось на основе алгоритма, представленного на рис. 2. Кроме расчетов электрических режимов методика, реализованная в ПК Fazonord, позволяет определять нагревы токоведущих частей и трансформаторов СТЭ по методике, описанной в [23].

Результаты моделирования

Для количественной оценки эффектов от применения ВИЭ выполнено моделирование в программном комплексе Fazonord AC-DC режимов СТЭ (рис. 3), к вводам 10 кВ ТП которой подключались ветропарки (ВП). Мощность ВП изменялась во времени по графикам, приведенным на рис. 4. Результаты моделирования представлены на рис. 5–13 и в табл. 1. Характер изменений напряжений на токоприемниках электропоездов показан на рис. 5, 6. Из них

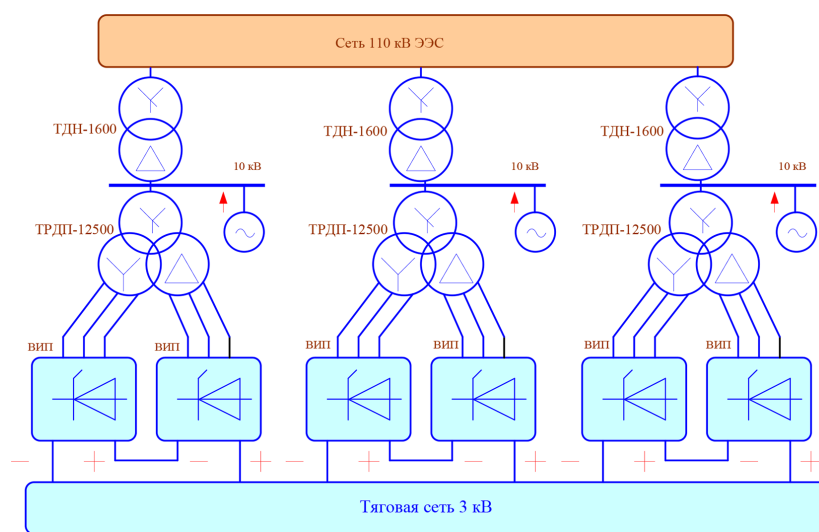


Рис. 3. Схема сети

Fig. 3. Network diagram

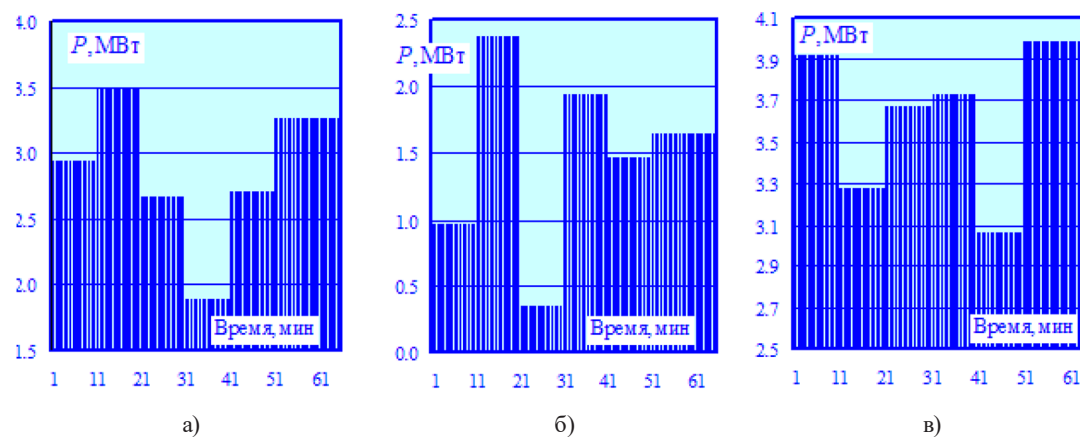


Рис. 4. Суммарная генерация ВП

Fig. 4. Total generation of VP

видно, что при включении ВП напряжения, подводимые к пантографам, увеличиваются на 1...2,5 %. Графики, характеризующие уровни несимметрии на шинах 110 кВ ТП, приведены на рис. 7, 8. На рис. 9 показаны диаграммы, характеризующие нагревы понизительных трансформаторов. Графики изменения потоков активной мощности и потерь в головной ЛЭП приведены на рис. 10.

Результаты определения режимов на частотах высших гармоник представлены в табл. 1 и на рис. 11–13.

Представленные на рис. 5–13 и в табл. 1 результаты моделирования позволяют сделать выводы, что за счет ВП достигаются следующие положительные эффекты:

- напряжения, подводимые к ЭПС, увеличиваются на 1...2,5 %.
- коэффициенты k_{2U} на вводах 110 кВ ТП снижаются на 60...64 %.
- коэффициенты гармоник k_U уменьшаются в 2,6...2,8 раза.
- средние значения потерь мощности в головной ЛЭП 110 кВ понижаются 2,4 раза.

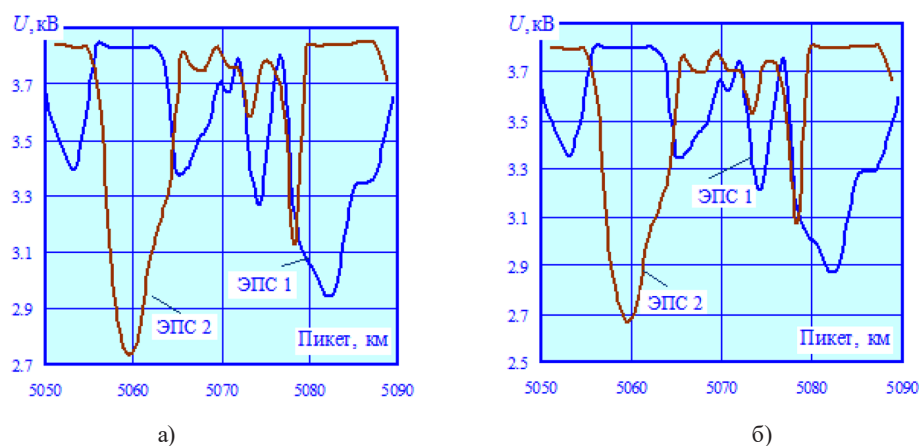


Рис. 5. Напряжения на пантографах электровозов: а – ВП включены; б – ВП отключены

Fig. 5. Voltages on electric locomotive pantographs: а – VP are on; б – VP are off.

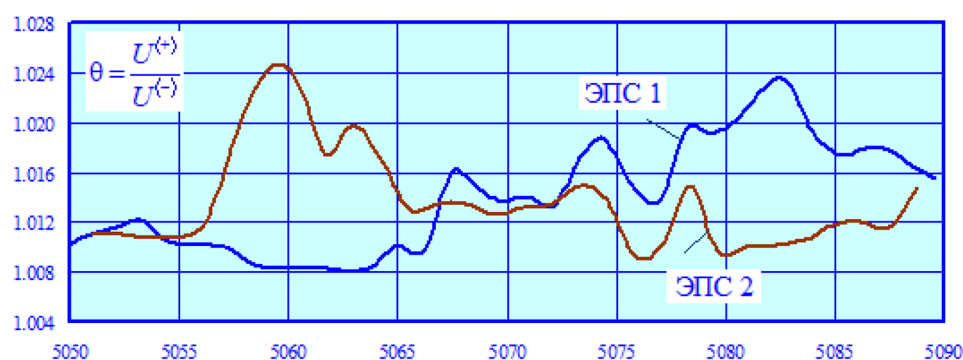


Рис. 6. Отношения напряжений: $U^{(+)}$ – ВП включены; $U^{(-)}$ – ВП отключены

Fig. 6. Voltage relationships: $U^{(+)}$ – VPs are on; $U^{(-)}$ – VPs are off

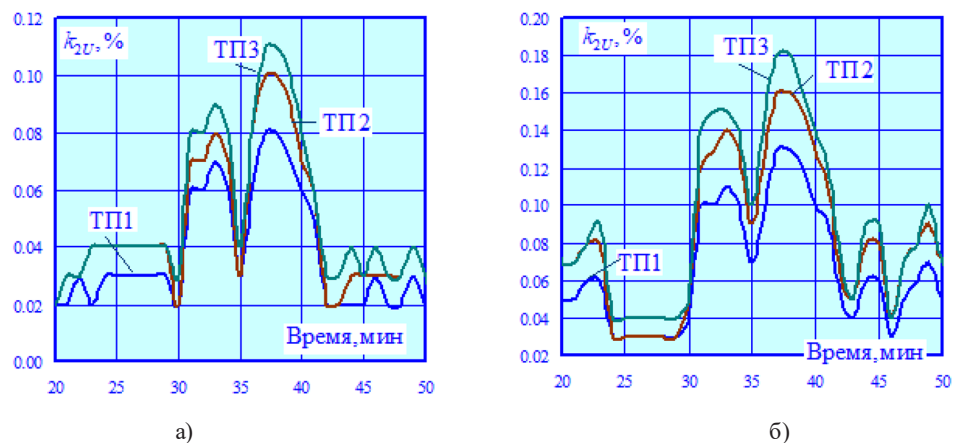
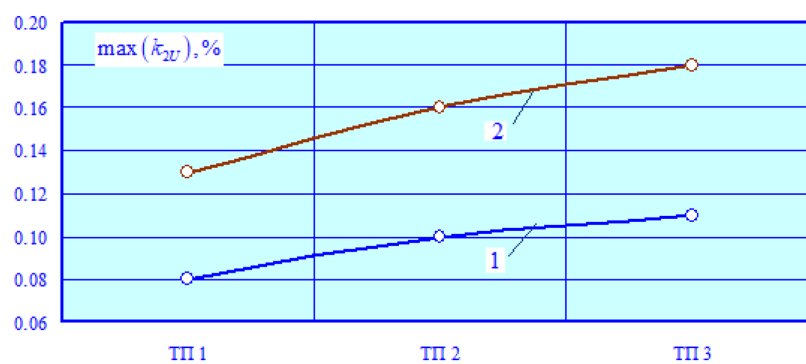
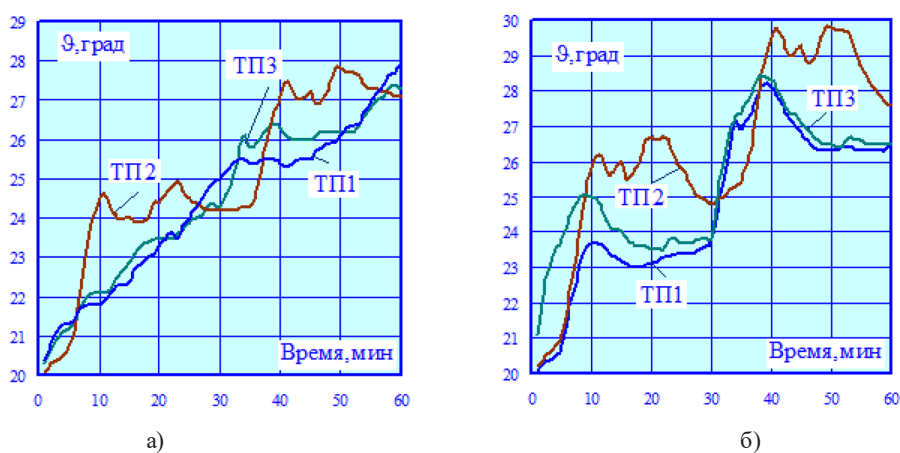
Рис. 7. Графики $k_{2U} = k_{2U}(t)$: а – ВП включены; б – ВП отключеныFig. 7. Graphs $k_{2U} = k_{2U}(t)$: а – VPs are on; б – VPs are offРис. 8. Максимумы k_{2U} : 1 – ВП включены; 2 – ВП отключеныFig. 8. Maxima k_{2U} : 1 – VP on; 2 – VP off

Рис. 9. Температуры наиболее нагретых точек понизительных трансформаторов: а – ВП включены; б – ВП отключены

Fig. 9. Temperatures of the hottest points of step-down transformers: а – VP on; б – VP off

Таблица 1. Максимумы коэффициентов гармоник, %

Table 1. Maximum harmonic coefficients, %

Режим	ТП	Фаза А	Фаза В	Фаза С
ВП включены	ТП 1	2,05	1,94	1,98
	ТП 2	2,57	2,43	2,49
	ТП 3	2,71	2,57	2,62
ВП отключены	ТП 1	5,71	5,22	5,37
	ТП 2	7,14	6,53	6,71
	ТП 3	7,72	7,07	7,27

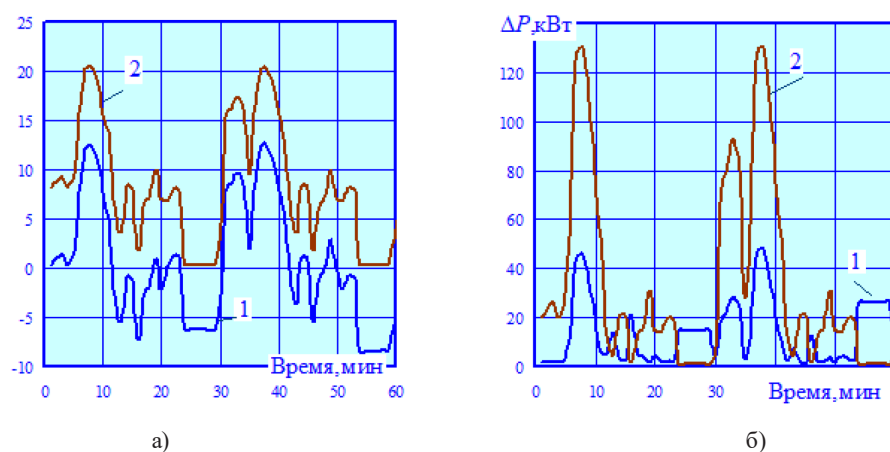
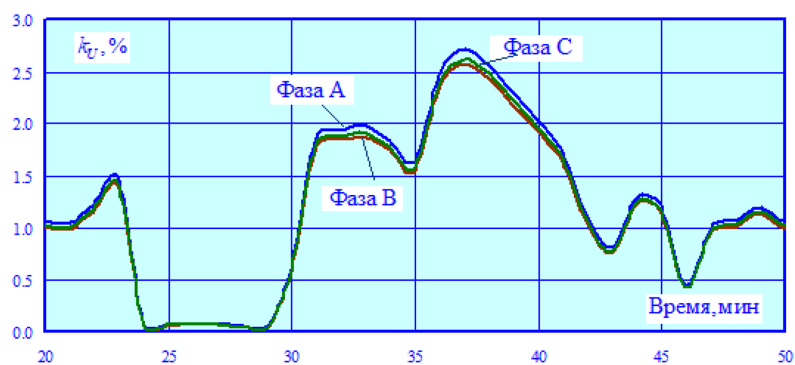


Рис. 10. Потоки активной мощности (а) и потери б) в головной ЛЭП: 1 – ВП включены; 2 – ВП отключены

Fig. 10. Active power flows (a) and losses (б) in the main power transmission line: 1 – VP are on; 2 – VP are off

Рис. 11. График $k_U = k_U(t)$ для ТП 3 при включенных ВПFig. 11. Graph $k_U = k_U(t)$ for TP 3 with VPs enabled

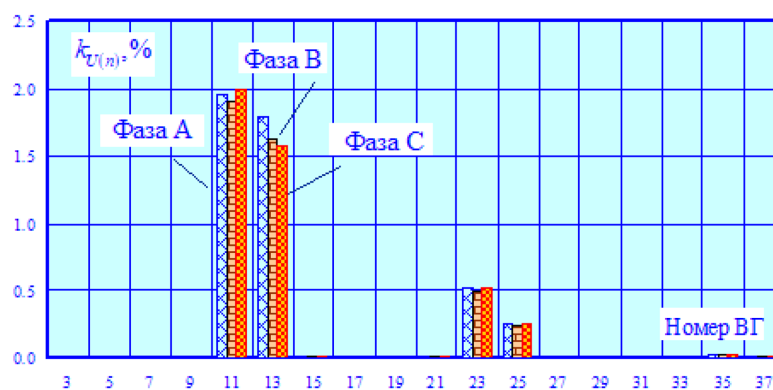


Рис. 12. Спектральный состав гармоник на шинах 110 кВ ТП 3 при включенных ВП

Fig. 12. Spectral composition of harmonics on 110 kV buses of TP 3 with the VPs turned on

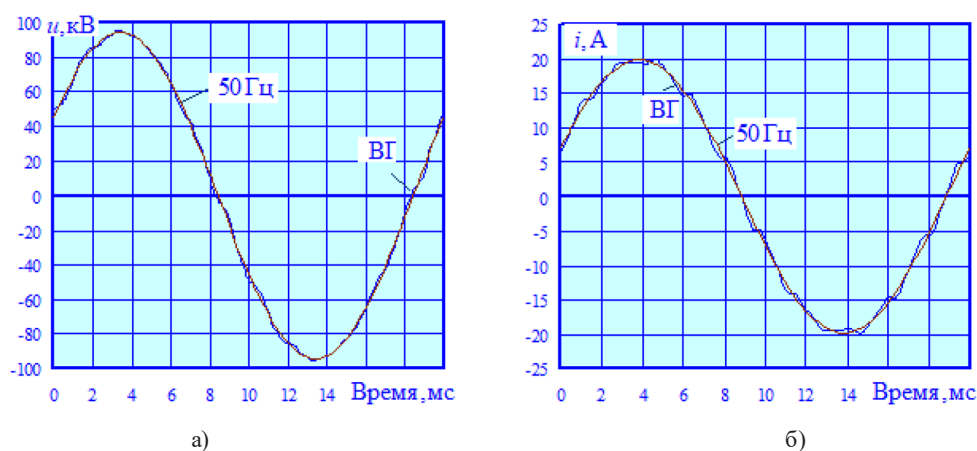


Рис. 13. Формы кривых напряжения (а) и тока (б) на шинах 110 кВ ТП 3 при включенных ВП

Fig. 13. Voltage (a) and current (б) curve shapes on 110 kV buses of TP 3 with the VPs turned on

Кроме того, наличие дополнительного источника энергии повышает надежность электро-снабжения ответственных потребителей электроэнергии, таких как объекты сигнализации, централизации и автоблокировки.

Заключение

Разработаны модели систем тягового электроснабжения с ВИЭ, реализованные в ПК Fazonord AC–DC. С их помощью возможно решение следующих задач:

- оценка воздействия ВИЭ на качество электроэнергии;
- определение областей их применения в СЭЖТ;
- выявление мест наилучшего размещения ВИЭ в сетях.

Результаты цифрового моделирования СЭЖТ участка магистральной железной дороги позволяют сформулировать следующие положения:

- применение ВИЭ дает возможность стабилизировать напряжения на токоприемниках электропоездов, снизить уровни несимметрии и несинусоидальности на шинах 110 кВ ТП;
- при наличии ВИЭ уменьшается электропотребление их ЭЭС и потери мощности в ЛЭП и тяговых трансформаторах (ТТ), а также существенно снижаются нагревы ТТ.

Таким образом, на основе интеграции ВИЭ в СЭЖТ можно повысить показатели энергоэффективности и улучшить качество электроэнергии. За счет снижения электропотребления из ЭЭС, использующей тепловые электростанции, могут быть заметно уменьшены выбросы парниковых газов.

Список литературы / References

- [1] Laxman Singh, Chandan Vaishnav, Vivek Shrivastava. Performance Analysis of Hybrid Network of Indian Traction Power System Using Renewable Energy Sources. *2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE)*. 2016. Publisher IEEE.
- [2] Swapna K Bade, Vana Kulkarni. Use of Renewable energy in performance enhancement of Indian Traction Power Supply System. *2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS)*. 2018. Publisher IEEE.
- [3] Swapna K. Bade, V.A Kulkarni. Analysis of Railway Traction Power System Using Renewable Energy: A Review. *2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. 2018. Publisher IEEE.
- [4] Hongzhi Dong, Zhongbei Tian, Joseph W. Spencer, David Fletcher, Lei Fang. Control Strategy and Analysis of Railway Traction System with Energy Storage System and Renewable Energy Source. *2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES)*. 2022. Publisher IEEE.
- [5] Valeriy Kuznetsov, Vitaliy Kuznetsov, Oleh Bondar, Artur Rojek, Petro Hubskeyi, Piotr Stypulkowski. Study of Short Circuit Currents in a Distributed Traction Power Supply System with Renewable Electric Power Sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. Publisher IEEE.
- [6] Shashikant Bakre, Priya Gokhale. Neural Network Based Source Selection Scheme for Wind-solar Based Auxiliary Supply in Railway Traction Systems. *2020 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)*. 2020. Publisher IEEE.
- [7] Peng Cheng, Huiwen Kong, Jing Ma, Limin Jia. Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021. Volume: 7. Issue: 5. Publisher IEEE.
- [8] Hongzhi Dong, Zhongbei Tian, Joseph W. Spencer, David Fletcher, Siavash Hajiabady. Coordinated Control Strategy of Railway Multisource Traction System With Energy Storage and Renewable Energy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023 | Volume: 24, Issue: 12. Publisher IEEE.
- [9] Weilan Li, Shaofeng Xie, Hui Wang. An Assessment Method of Negative Sequences Aiming at the Continuous Co-Phase Traction Power Supply System. *2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. 2024. Publisher IEEE.
- [10] Qi Guo, Xin Wang, Chunming Tu, Liang Che, Fan Xiao, Yuchao Hou. A Multitimescale Energy Management Strategy for Advanced Cophase Traction Power Supply System With PV and ES. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2025. Volume: 11. Issue: 1. Publisher IEEE.

- [11] Nakaret Kano, Zhongbei Tian, Nutthaka Chinomi, Xiaoguang Wei, Stuart Hillmansen. Renewable Sources and Energy Storage Optimization to Minimize the Global Costs of Railways. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Publisher IEEE.
- [12] M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Henni, A. Aboubou, M. Benaouadj. Design and realization of hybrid source using solar panel, wind generator and supercapacitors for train traction. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. 2011. Publisher IEEE.
- [13] Jingru Lian, Chaohua Dai, Zhigang Yao, Haitao Hu, Weirong Chen, Caisheng Wang. A Novel Interphase-Bridging Single-Phase Inverter for Photovoltaic and Energy Storage Connected to Railway Traction Power Supply System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2025. Volume: 11. Issue: 1. Publisher IEEE.
- [14] Zhaoxin Jia, Zhongping Yang, Fei Lin, Xiaochun Fang. Dynamic simulation of the DC traction power system considering energy storage devices. *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2014. Publisher IEEE.
- [15] YuYang Wan, Yanbo Wang, Pengcheng Han, Xiaoqiong He, Zhe Chen. Renewable Microgrid Technology for Electrified Transportation: A Review. *2024 13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2024. Publisher IEEE.
- [16] Limin Jia, Jing Ma, Peng Cheng, Yikai Liu. A perspective on solar energy-powered road and rail transportation in China. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2020 | Volume: 6, Issue: 4. Publisher IEEE.
- [17] Alper Çiçek, İbrahim Şengör, Sıtkı Güner, Furkan Karakuş, Ayşe Kübra Erenoğlu, Ozan Erdinç, Miadrezha Shafie-Khah, João P. S. Integrated Rail System and EV Parking Lot Operation With Regenerative Braking Energy, Energy Storage System and PV Availability. *Catalão IEEE Transactions on Smart Grid* 2022. Volume: 13. Issue: 4. Publisher IEEE.
- [18] Peter J. van Duijsen, Diêgo C. Zuidervliet. Distribution Of Renewable Energy In Light-Rail Traction Grids. *2022 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC) 2022*. Publisher IEEE.
- [19] Ramchandra S Nale, Tanmay T Jadhav, Pooja S Chobe, D B Pardeshi. Solar Rails: Advancements in Renewable Energy for Transportation. *2024 4th Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON) 2024*. Publisher IEEE.
- [20] Muhammad Mubeen Khan, Ijaz Khan, Musadiq Rauf, Insha Ullah, Salman Aatif, Mohammed Majeed Al Bayati. Electrified Transportation in Smart Cities: Optimal Utilization of PV for Electrified Railways and EV Charging Station. *2024 International Conference on IT and Industrial Technologies (ICIT)*. 2024. Publisher IEEE.
- [21] Beyhan Kilic, Erkan Dursun. Integration of innovative photovoltaic technology to the railway trains: A case study for Istanbul airport-M1 light metro line. *IEEE EUROCON 2017–17th International Conference on Smart Technologies*. 2017. Publisher IEEE.
- [22] B. Dekeda, M. Adonis. The Case for Integration of Renewables in Rail Freight Yards in South Africa *2019 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE) 2019*. Publisher IEEE.
- [23] Закарюкин В. П., Крюков А.В. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем*. Иркутск: Изд-во Иркут. унта. 2005. 273 с. [Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Complex Asymmetrical Modes of Electrical Systems*. Irkutsk: Publisher of Irkutsk State University. 2005. 273 p. (in Rus.)].

[24] *Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: моделирование и управление* / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. Е. Крюков. М.: Директ-Медиа, 2024. 181 с. [Bulatov Yu.N., Kryukov A. V., Suslov K. V., Kryukov A. E. *Renewable Energy Power Systems: Modeling and Control*. Moscow: Direct-Media, 2024. 181 p].

[25] Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. Москва: Директ-Медиа, 2023. 198 с. [Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates*. Moscow: Direct-Media, 2023. 198 p. (in Rus.)].

[26] Крюков А. В., Черепанов А. В., Нгуен Х. К., Крюков А. Е. Совместное моделирование режимов электрических сетей переменного и постоянного тока. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та. путей сообщения. 184 с. [Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Nguen H. K., Kryukov A. E. *Joint modeling of AC and DC electrical networks*. Irkutsk: Publisher of Irkutsk State Transport University, 2024. 184 p. (in Rus.)].

EDN: JNPYUQ

УДК 669.112.228.1–044.962

Peculiarities of Synthesis of Cobalt Ferrite on a Solar Furnace

Mukhammad-Sultanxan S. Payzullakhanov^{a, b*},
Fayzullo N. Ernazarov^a, Zuhra Abduraimova^a
and Naima H. Bazarova^b

^a*Institute of Materials Science*

of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

^b*National Research Institute of Renewable Energy Sources
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Received 09.03.2025, received in revised form 04.04.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. CoFe_2O_4 material with spinel structure of F_{d3m} syngony with unit cell parameter $a = 8,39 \text{ \AA}$ can be obtained by the method of synthesis from melt on solar furnace. It is shown that such material is resistant to water vapor and has low water absorption. It is revealed that the mechanism of electrical conductivity of perovskite material of CoFe_2O_4 composition is electronic and associated with polaron hopping. An assumption is made that CoFe_2O_4 can be used as a catalyst for synthesis gas production. As a result of this work, the dependence of synthesis gas yield on the mass of the catalyst was obtained. At non-catalytic gasification of rice husk the yield of gaseous products amounted to 34 %, and solid residue was formed in the amount of 37 %. In case of catalytic gasification, an increase in gas phase yield up to 60 % was observed. Acceleration of the gasification process is also observed.

Keywords: cobalt ferrite, hydrogen, catalyst, renewable energy, resource, efficiency, solar furnace, spinel, ceramic, magnet.

Citation: Payzullakhanov M-S. S., Ernazarov F. N., Abduraimova Z., Bazarova N. H. Peculiarities of Synthesis of Cobalt Ferrite on a Solar Furnace. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 488–497. EDN: JNPYUQ



Особенности синтеза феррита кобальта на солнечной печи

М. С. Пайзуллаханов^{а, б}, Ф. Н. Эрназаров^а,
З. Абдураимова^а, Н. Х. Базарова^б

^аИнститут материаловедения

Академии наук Республики Узбекистан

^бНациональный научно-исследовательский институт
возобновляемых источников энергии
Республика Узбекистан, Ташкент

Аннотация. Методом синтеза из расплава на солнечной печи может быть получен материал CoFe_2O_4 со структурой шпинели F_{d3m} сингонии с параметром элементарной ячейки $a = 8,39$ Å. Показано, что такой материал проявляет стойкость к воздействию водяных паров, имеет низкое водопоглощение. Выявлено, что механизм электрической проводимости перовскитового материала состава CoFe_2O_4 является электронным и связан с прыжками поляронов. Сделано предположение о том, что CoFe_2O_4 может быть использован как катализатор при получении синтез-газа. В результате проделанной работы получена зависимость выхода синтез-газа от массы катализатора. При некаталитической газификации шелухи риса выход газообразных продуктов составил 34 %, а твердый остаток образовался в количестве 37 %. В случае каталитической газификации наблюдается увеличение выхода газовой фазы до 60 %. Также наблюдается ускорение процесса газификации.

Ключевые слова: феррит кобальта, водород, катализатор, возобновляемая энергия, ресурс, эффективность, солнечная печь, шпинель, керамика, магнит.

Цитирование: Пайзуллаханов М. С. Особенности синтеза феррита кобальта на солнечной печи / М. С. Пайзуллаханов, Ф. Н. Эрназаров, З. Абдураимова, Н. Х. Базарова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 488–497. EDN: JNPYUQ

Введение

Сегодня потребность в топливе и электроэнергии в нашей стране возрастает, а это требует эффективного и целенаправленного использования природных ресурсов. Поэтому поощряется широкое применение водорода и возобновляемых источников энергии для потребления и производства населением. Водород рассматривают в качестве топлива будущего, поскольку он является экологически чистым энергоносителем и играет важную роль в быстро развивающейся технологии различных топливных элементов.

При электро- или фотохимическом расщеплении воды образуются водород и кислород, процессы разложения воды могут служить для получения возобновляемой энергии, однако, как правило, выделение кислорода ускоряет один катализатор, а выделение водорода – другой. Необходимость использования двух катализаторов является существенной проблемой для упрощения процесса – поскольку каждому катализатору требуется свой собственный подход к оптимизации, их интеграцию в единое устройство не всегда просто обеспечить.

Свойства материала, такие как размер частиц, структура, микроструктура и удельная поверхность, фазовая стабильность, определяются методом его получения. Основными методами синтеза являются твердофазные реакции, термическое разложение, гидротермальные и соль-

вотермальные методы, совместное осаждение, золь-гель и микроволновая обработка. При этом каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и нет оптимального способа получения высококачественных ферритовых материалов из шпинели. Поэтому изучение структуры и свойств феррита кобальта CoFe_2O_4 , синтезированного из расплава смеси $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CoO}$ на солнечной печи, является актуальным.

Материалы со структурой шпинели MFe_2O_4 (М – двухвалентный катион) представляют собой многофункциональную керамику и привлекают большое внимание исследователей. Например, шпинели на основе феррита кобальта (II) CoFe_2O_4 относятся к магнитным материалам [1, 2]. В то же время феррит кобальта может быть использован как электрод литий-ионных источников тока [3], топливных элементов [4]. Предполагается, наблюдаемые свойства могут быть регулированы варьированием микроструктуры керамического материала. Следовательно, изучение феррита кобальта со структурой шпинели, синтезированного из расплава на солнечной печи, представляется актуальным.

В данной работе был исследован катализатор CoFe_2O_4 , синтезированный в потоке солнечного излучения плотностью 200 Вт/см^2 в однозеркальной солнечной печи.

Методология

Солнечные технологии, в отличие от традиционных, характеризуются высокой скоростью нагрева, позволяют получить мелкодисперсный однородный материал высокой химической чистоты. В то же время в ферритовых материалах одновременно происходит процесс ферритизации. Такие особенности обуславливают возможности создания усовершенствованной керамики, композитов интерметаллических составов, функционально-градиентных материалов [5–8].

Стехиометрические количества сырья, рассчитанные в мольных процентах, сначала смешивали и измельчали мокрым способом на шаровой мельнице с корундовыми шарами в течение 8 часов. На базе готовой смеси формовались (50 кН) образцы диаметром 5 мм и длиной 140 мм, которые устанавливались на фокальную плоскость солнечной печи и расплавлялись под воздействием концентрированного солнечного излучения при плотности потока 200 Вт/см^2 . Расплавы охлаждались методом слива в воду, при которой скорость охлаждения составляла порядка 1000 град/с . Затем материал измельчали мокрым способом до размера 1–10 мкм [9–11].

Рентгенофазовый анализ образцов полученных материалов выполнен на дифрактометре Panalytical Empyrean с программным обеспечением в геометрии отражения Брэгга-Брентано с $\text{CuK}\alpha$ – излучения ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Данные были получены между 10° и 64° с шагом $0,5^\circ$.

Исследования морфологии и микроструктурных особенностей образцов материалов проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) Центра передовых технологий Министерства инновационного развития.

Термогравиметрические (ТГ) кривые были получены на приборе TG50 в воздушном потоке со скоростью нагрева $10 \text{ градусов Цельсия}$ в минуту с использованием около 50 мг пробы.

Температурный коэффициент термического расширения измеряли на катетометре в интервале температур $300\text{--}1250 \text{ К}$. Электрическое сопротивление измеряли четырехконтактным методом в интервале температур $300\text{--}1300 \text{ К}$. На рис. 1 приведены кривые ДТА и ТГ образцов смеси оксидов кобальта и железа.

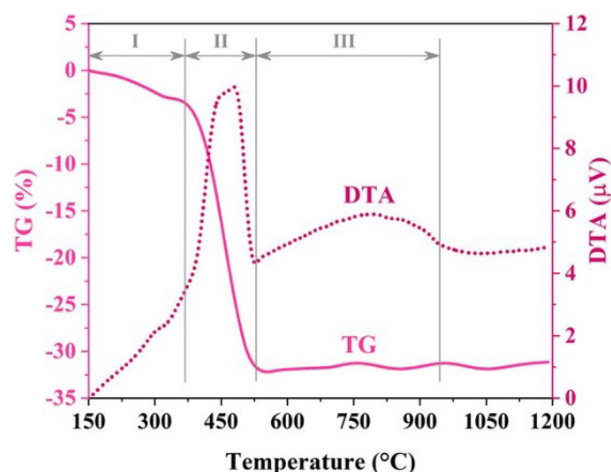


Рис. 1. ДТА и ТГ образцов смеси оксидов кобальта и железа

Fig. 1. DTA and TG of cobalt and iron oxide mixture samples

Анализ ДТА-ТГ проводится для исследования поведения предшественника CoFe_2O_4 при прокаливании. Как видно на рис. 1, линии ДТА представляют собой два заметных экзотермических пика. Первый резкий приписывается к образованию ферритной фазы шпинели. При этом диапазоне температур остаточные компоненты разлагаются, и впоследствии в интервале 400–520 °С аморфный порошок кристаллизуется с образованием нанокристаллического шпинель-феррита. Широкий пик с центром при ~ 800 °С представляет собой уплотнение CoFe_2O_4 . Наночастицы CoFe_2O_4 агломерируются из-за их высокой поверхностной энергии и магнитных свойств, что приводит к выделению тепла, которое проявляется в широком пике.

Процент потери массы свежеприготовленного порошка, нагретого до 1200 °С, представлен на рис. 1. Первый этап потери массы прихватки происходит при температуре ~ 400 °С, что представляет собой испарение поглощенной воды и термическое разложение или сжигание других органических соединений. На этот этап приходится менее 5 % от общей потери массы. Вторая ступень имеет большую массу потери, связанной с образованием фазы феррита шпинели. Эта стадия соответствует резкому экзотермическому пику кривой ДТА. На графике ТГ больше не было обнаружено потери массы при температуре выше ~ 600 °С.

Как обсуждалось, первая стадия (150–375 °С) представляет собой удаление поглощенной воды и других органических соединений. Примечательно, что одновременное появление экзотермических и эндотермических реакций не позволяет обнаружить очевидный пик на кривых ДТА. На средней стадии, сравнивая кривые ДТА, видно, что образование CoFe_2O_4 сдвигается в сторону более высокого температурного диапазона.

Увеличение температуры на втором этапе потери массы будет объяснено аналогичным образом. Последний этап (до 1000 °С) содержит широкий экзотермический пик ДТА, что связано с уплотнением. Поэтому никакой потери массы на этом этапе не было получено.

Далее нами проведен синтез феррита кобальта на основе смеси оксидов кобальта и железа на солнечной печи. На рис. 2 показана рентгенограмма образца материала состава CoFe_2O_4 , полученного синтезом из расплава на солнечной печи.



Анализ рентгенограмм показал, что полученный материал заданного состава имеет структуру шпинели сингонии F_{d3m} с параметром решетки $a = 8,39 \text{ \AA}$

$$d_x = \frac{8M}{a^3 N_A},$$

Для оценки степени кристалличности образцов воспользовались соотношением:

$$\left(1 - \frac{I_{\Phi_{OH}}}{I_{311}}\right) \times 100 \%,$$

Вклад микронапряжений в кристаллической решетке со средним размером кристаллитов, приводящим к уширению пика, рассчитывали по методу Уильямсона-Холла.

$$\beta \cos \theta = \left(\frac{K\lambda}{t} \right) + 4\epsilon \sin \theta$$

где β – полная ширина на половине высоты (FWHM), θ – угол дифракции, K – коэффициент формы, λ – излучение длины волны, t – средний размер кристаллитов, ε – размер микронапряжения. Линейная аппроксимация графика зависимости $\beta \cos \theta$ от $4 \sin \theta$ дает ε как наклон и $K\lambda/t$ как точка пересечения. Для образцов феррита кобальта, синтезированных на солнечной печи, получены следующие значения: $t = 70$ нм, $\varepsilon = 0,03$ %. На рис. 3 и 4 приведены зависимости усадки и кажущейся плотности материала от температуры спекания.

Как видно из рис. 3 и 4, при повышении температуры спекания керамики наблюдается увеличение усадки и кажущейся плотности. На рис. 5 и 6 приведены зависимости электрического сопротивления и водопоглощения образца материала от температуры спекания.

Как видно из рис. 5, с ростом температуры наблюдается возрастание электрического сопротивления, т.е. образцы материала демонстрируют полупроводниковый характер с электронным механизмом проводимости. В то время как из рис. 6 видно, что повышение температуры спекания керамики до 1200°C вызывает уменьшение водопоглощения.

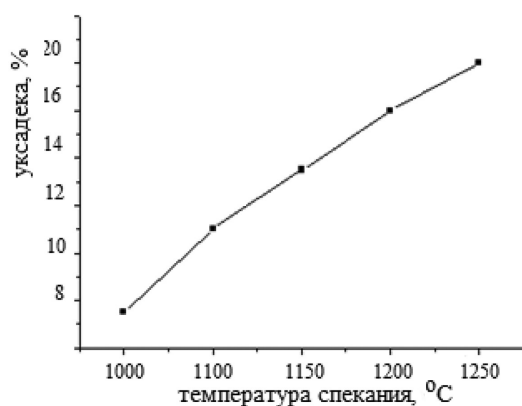


Рис. 3. Зависимость усадки от температуры спекания

Fig. 3. Dependence of shrinkage on sintering temperature

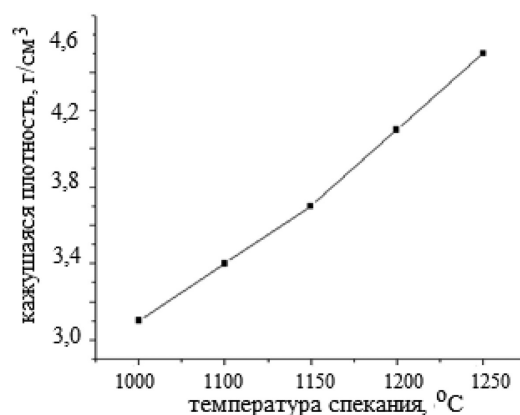


Рис. 4. Зависимость плотности от температуры спекания

Fig. 4. Dependence of density on sintering temperature

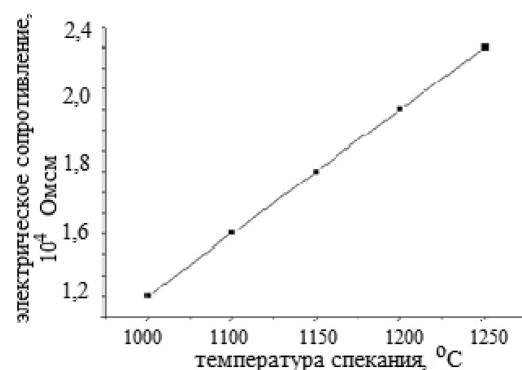


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления от температуры спекания

Fig. 5. Dependence of electrical resistance on sintering temperature

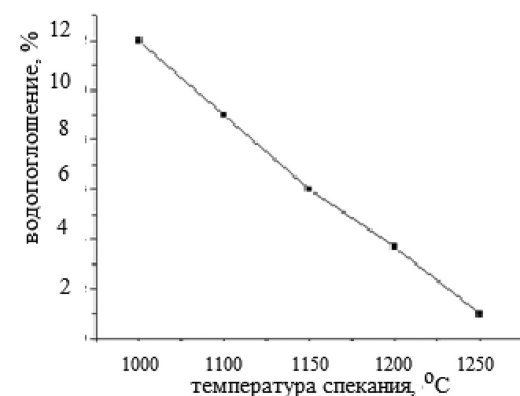


Рис. 6. Зависимость водопоглощения от температуры спекания

Fig. 6. Dependence of water absorption on sintering temperature

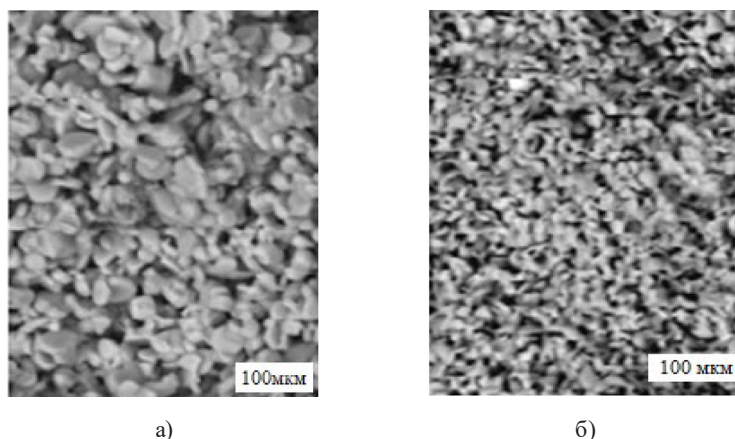


Рис. 7. Микроструктура образца материала состава CoFe_2O_4 , спеченного при 1100 (а) и 1250 °C (б)

Fig. 7. Microstructure of a sample of CoFe_2O_4 material sintered at 1100 (a) and 1250 °C (b)

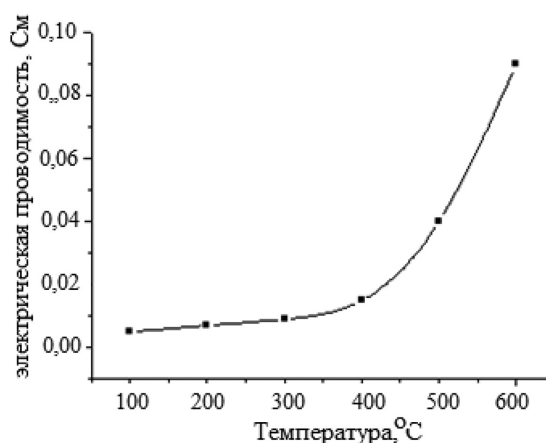


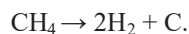
Рис. 8. Температурная зависимость электрической проводимости образца, спеченного при 1250 °C

Fig. 8. Temperature dependence of electrical conductivity of the sample sintered at 1250 °C

На рис. 7 приведена микроструктура образца материала, спеченного при 1100 и 1250 °C. Из рисунка видно, что средний размер кристаллитов зерен составляет 30–40 мкм. Причем зерна имеют форму преимущественно сферолитов и искривленных цилиндров.

На рис. 8 приведена температурная зависимость электрической проводимости образца материала, спеченного при 1250 °C. Как видно из рисунка, электрическая проводимость на постоянном токе увеличивается с повышением температуры. Можно предположить, что механизм электрической проводимости связан с прыжками поляронов. По-видимому, при достаточно большой тепловой энергии электроны пересекают барьер и участвуют в прыжках. С увеличением температуры скорость успешных прыжков увеличивается, что, в свою очередь, приводит к увеличению проводимости [12]. С другой стороны, повышение температуры также стимулирует увеличение количества вакансий, которые априори ответственны за увеличение проводимости по модели скачкообразной релаксации [13].

Согласно [12, 13], механизм электрической проводимости перовскитового материала состава CoFe_2O_4 является электронным и связан с прыжками поляронов. Как показывает анализ данных [14], добавка водорода в топливные смеси способна существенно повысить КПД двигателей внутреннего сгорания, снизить химический недожог и уменьшить содержание вредных примесей в отходящих газах. В этом отношении перспективной технологией, позволяющей получать водородсодержащее топливо с высокой концентрацией водорода без примесей оксидов углерода, является каталитический пиролиз углеводородов.



Пиролиз проводят с использованием проточной каталитической установки Autoclave Engineers BTRS-Jn в трубчатом металлическом реакторе при температуре процесса 675 °С и давлениях 1 и 5 атм. Из вышеприведенной реакции видно, что помимо водорода в ходе данного процесса образуется также углерод. По всей видимости, получаемый при этом углерод представляет собой нановолокнистый продукт с уникальными физико-химическими свойствами [15]. Синтезированные материалы охарактеризованы методами рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции азота, методами Дебая-Шеррера. Нами определено, что феррит кобальта имеет развитую поверхность, значение площади поверхности по методу составляет 16 м²/г, средний размер кристаллитов, определенный по уравнению Дебая-Шеррера, составляет 4,0 нм.

Таблица 1. Влияние катализатора на выход газовой смеси из шелухи риса

Table 1. Effect of catalyst on the yield of gas mixture from rice husk

Количество катализатора, масс. %	5	10	15
Выход продукта – газовой смеси, % от массы	40	54	60

Для исследования процесса газификации использовалась шелуха риса с влажностью 8 % и зольностью 22.5 %. Исследование процесса газификации проводилось в интервале температур 550–650 °С. Скорость подачи газа-носителя (воздуха) варьировалась в интервале от 0.6 до 0.9 л/мин. Масса навески шелухи риса составляла 2 г. В качестве катализаторов процесса газификации использовался феррит кобальта (CoFe_2O_4). Массовое содержание катализатора в составе пробы изменялось от 1 до 15 % масс. В табл. 1 приведены результаты газификации органического сырья – шелухи риса в присутствии феррита кобальта как катализатора.

Заключение

Технологический маршрут, включающий плавление на солнечной печи стехиометрической смеси оксида кобальта с оксидом железа, закалку расплава в воду, измельчение отливка и формование с последующим спеканием при 1300 К, позволяет получить материал на основе шпинель структуры феррита кобальта CoFe_2O_4 с развитой тонкой микроструктурой (со средним размером зерен 2–5 мкм).

Методом синтеза из расплава на солнечной печи может быть получен материал CoFe_2O_4 со структурой шпинели F_{d3m} сингонии с параметром элементарной ячейки $a = 8,39 \text{ \AA}$.

Показано, что такой материал проявляет стойкость к воздействию водяных паров, имеет низкое водопоглощение.

Выявлено, что механизм электрической проводимости перовскитового материала состава CoFe_2O_4 является электронным и связан с прыжками поляронов.

Сделано предположение, что CoFe_2O_4 может быть использован как катализатор при получении синтез-газа. В результате проделанной работы получена зависимость выхода синтез-газа от массы катализатора. При некаталитической газификации шелухи риса выход газообразных продуктов составил 34 %, а твердый остаток образовался в количестве 37 %. В случае каталитической газификации наблюдается увеличение выхода газовой фазы до 60 %. Также наблюдается ускорение процесса газификации.

Определены свойства полученных материалов, позволяющие использовать их в кислородных мембранах, катодных и анодных материалах, а также в системах хранения водорода.

Список литературы /References

- [1] Dai Y.Q., Dai J. M., Tang X. W., Zi Z. F. et al. Magnetism of CoFe_2O_4 thin films annealed under the magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 394, 287–291.
- [2] Singh S., Munjal S., Khare N. Strain/defect induced enhanced coercivity in single domain CoFe_2O_4 nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 386, 69–73.
- [3] Tansel S., Emine K., Melike S., Önder M. Monodisperse CoFe_2O_4 nanoparticles supported on Vulcan XC-72: High performance electrode materials for lithium-air and lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2015, 288, 36–41.
- [4] Urbain F., Du R., Tang P., Smirnov V. et al. Upscaling high activity oxygen evolution catalysts based on CoFe_2O_4 nanoparticles supported on nickel foam for power-to-gas electrochemical conversion with energy efficiencies above 80 %. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 259, 118055.
- [5] Atabaev I.G., Faiziev Sh.A., Paizullakhanov M. S., Shermatov Zh.Z., Razhamatov O. High-strength glass-ceramic materials synthesized in a large solar furnace. *Journal of Applied Solar Energy*, 2015, 51, 202–205.
- [6] Paizullakhanov M.S., Shermatov Zh.Z., Nodirmatov E. Z., Rajamatov O. T., Ernazarov F. N., Sulaimanov M. T., Nurmatov Sh., Cherenda N. N. Synthesis of materials by concentrated solar radiation. *Journal of High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2021, 25(2).
- [7] Paizullakhanov M. S., Karshieva N. Kh., Ernazarov F. N., Abduraimov S. M., and Sabirov S. S. Studying the Possibility of Applying Barium-Strontium Cobaltite in Hydrogen Energy. *Thermal Engineering*, 2024, 71(3), 280–284/
- [8] Klychev Sh. I., Zakhidov R. A., Bakhramov S. A., Paizullakhanov M. S., Olav S. A., Suvonova L. S., Sobirov Y. B., and Makhmudov S. Sh. Optical Energy Characteristics of Large Solar Furnaces. *Applied Solar Energy*, 2024, 60(1), 58–65.
- [9] Paizullakhanov M.S., Suvonova L. S., Cherenda N. N. Synthesis of a silicon carbide from natural raw material in a solar furnace. *High Temperature Material Processes*, 2024, 28(1), 19–25.

[10]Basak M., Rahman M. L., Ahmed M. F. Calcination effect on structural, morphological and magnetic properties of nano-sized CoFe_2O_4 developed by a simple co-precipitation technique. *Mater. Chem. Phys.*, 2021, 264, 124442

[11]Gharagozlou M. Synthesis, characterization and influence of calcination temperature on magnetic properties of nanocrystalline spinel Co-ferrite prepared by polymeric precursor method. *J. Alloys Compd.*, 2009, 486, 660–665

[12]Funke K. Jump relaxation model and coupling model-a comparison. *J. Non-Cryst. Solids.*, 1994, 172, 1215–1221 [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)90646-7](https://doi.org/10.1016/0022-3093(94)90646-7)

[13]Torres D., De Llobet S., Pinilla J. L., Lázaro M. J., Suelves I., Moliner R. Hydrogen production by catalytic decomposition of methane using a Fe-based catalyst in a fluidized bed reactor. *J. Nat. Gas. Chem.*, 2012, 21, 367–73.

[14]Gudyma T. S., Lapekin N. I., Popov M. V., Bannov A. G. Application of ice to the synthesis of graphite oxide: a modified hummers method. *Solid Fuel Chemistry*, 2022, 56, 347–352.

[15]Shao Z., Yang W., Cong Y., Dong H., Tong J., Xiong G. Investigation of the permeation behavior and stability of a $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-x}$ oxygen membrane. *J. Membrane Sci.*, 2000, 172, 177–188.

Radio Location & Radio Navigation
Радиолокация и радионавигация

EDN: IGPZVQ

УДК 629.7.054.07

Navigation Support for Group Use of Drones

**Dmitry D. Dmitriev, Evgeny D. Mikhov,
Andrey B. Gladyshev, Vasily N. Ratushnyak,
Andrey V. Lykho* and Alexander V. Karavanov**
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 30.04.2025, received in revised form 04.05.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. The article examines issues of navigation support for drones for their use as part of organized groups. The group use of drones allows for a significant increase in their efficiency – simultaneous monitoring and mapping of large areas, distributing goals and tasks between group members, reducing the time required to complete an operation by evenly distributing tasks within the group, etc. The main problem for organizing the group use of drones is the insufficient accuracy of their navigation support. In the vast majority of cases, the basis of onboard navigation systems are GNSS receivers. In this case, to obtain acceptable accuracy indicators, it is necessary to use differential modes of PPK and RTK operation. This requires the organization of communication channels for transmitting differential corrections and increasing the computational complexity of algorithms for solving the navigation problem. The article proposes a method for measuring mutual coordinates using GNSS receivers of all drones in a group of a single constellation of navigation spacecraft. Unlike differential methods, it practically does not complicate the algorithms for solving the navigation problem and does not impose strict requirements on the data transmission channel. The group leader only needs to transmit information about his own measured coordinates and the composition of the navigation spacecraft, whose signals are used to solve the navigation problem. The results of experimental studies of the proposed method showed that its application reduces the standard deviation of the measurement of mutual coordinates of GNSS receivers by approximately two times, and eliminates abrupt changes in coordinates caused by differences in the constellations of navigation spacecraft.

Keywords: satellite radio navigation, GLONASS, unmanned aerial vehicles, organization of group use of unmanned aerial vehicles, relative navigation measurements.

Acknowledgements. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25–19–20070, <https://rscf.ru/project/25–19–20070/>, and a grant from the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.



Навигационное обеспечение беспилотных летательных аппаратов для организации их группового применения

Д. Д. Дмитриев, Е. Д. Михов, А. Б. Гладышев
В. Н. Ратушняк, А. В. Лыхо, А. В. Караванов
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы навигационного обеспечения беспилотных летательных аппаратов для их применения в составе организованных групп. Групповое применение БПЛА позволяет существенно повысить их эффективность – осуществлять одновременный мониторинг и картографирование больших территорий, распределять цели и задачи между членами группы, снизить время выполнения операции за счет равномерного распределения задач в группе и т.п. Одной из важнейших проблем организации группового применения БПЛА является недостаточная точность их навигационного обеспечения. Учитывая, что в подавляющем большинстве случаев основой бортовых навигационных систем являются ГНСС-приемники, для получения приемлемых точностных показателей требуется применение дифференциальных режимов работы РПК и RTK, что требует организации каналов связи для передачи дифференциальных поправок и увеличения вычислительной сложности алгоритмов решения навигационной задачи. В отличие от дифференциальных методов, рассмотренный в статье метод измерения взаимных координат с использованием ГНСС-приемниками всех БПЛА в группе единого созвездия навигационных космических аппаратов практически не усложняет алгоритмы решения навигационной задачи, не предъявляет жестких требований к каналу передачи данных. Лидеру группы достаточно передавать информацию о собственных измеренных координатах и составе созвездия навигационных космических аппаратов, сигналы которых используются для решения навигационной задачи. Результаты экспериментальных исследований предложенного метода показали, что, несмотря на простоту его реализации, его применение уменьшает СКО измерения взаимных координат ГНСС-приемников примерно в два раза, устраняются скачкообразные изменения координат, вызываемые различием созвездий навигационных космических аппаратов.

Ключевые слова: спутниковая радионавигация, ГЛОНАСС, беспилотные летательные аппараты, организация группового применения беспилотных летательных аппаратов, относительные навигационные измерения.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–19–20070, <https://rscf.ru/project/25–19–20070/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Цитирование: Дмитриев Д. Д. Навигационное обеспечение беспилотных летательных аппаратов для организации их группового применения / Д. Д. Дмитриев, Е. Д. Михов, А. Б. Гладышев, В. Н. Ратушняк, А. В. Лыхо, А. В. Караванов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 498–508. EDN: IGPZVQ

Введение

В настоящее время наблюдается бурное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые применяются во многих областях как хозяйственной, так и оборонной деятельности развитых стран мира – картографирование местности, мониторинг стихийных бедствий, проведение поисково-спасательных работ, доставка грузов, ведение разведки, патрулирование удаленных площадных и протяженных объектов (нефтегазопроводов, линий электропередачи, железных дорог, лесных массивов) и т.д. [1]. Кроме того, развивается тенденция применения БПЛА в составе организованных групп, что позволяет существенно повысить их эффективность – осуществлять одновременный мониторинг и картографирование больших территорий, распределять цели и задачи между членами группы, снизить время выполнения операции за счет равномерного распределения задач в группе, формировать антенные решетки при радиолокационном зондировании и т.п. [2]. Имеется возможность и замены БПЛА средних и тяжелых классов группой БПЛА малого класса. Широкий диапазон задач, выполняемых БПЛА малого класса, работающими в составе группы, их относительная дешевизна, малая заметность по сравнению с БПЛА средних и тяжелых классов, а также высокая взаимозаменяемость отдельных БПЛА при выполнении операций делают исследования в данной области весьма перспективными [3]. В то же время применение БПЛА в составе организованных групп определяет существенное повышение требований к точности и надежности их навигационного обеспечения.

1. Проблемы организации группового применения БПЛА

Одной из важных проблем группового применения БПЛА является обеспечение траекторной безопасности из-за возможного пересечения траекторий движения и столкновения БПЛА на всех этапах функционирования группы [4]. Кроме того, возникает необходимость в применении систем управления, способных обеспечить поддержку строя группы и производить обход препятствий всей группой без нарушения целостности всей системы [5]. Учитывая достаточно жесткие требования к бортовым навигационным средствам БПЛА по массе, габаритам и энергопотреблению, применение ГНСС-приемников является практически безальтернативным для позиционирования БПЛА всех классов [6], но стандартные методы спутниковой навигации не обеспечивают требований по точности позиционирования членов группы между собой – типовая погрешность измерения координат в ГЛОНАСС и GPS составляет единицы метров. Причиной этого является достаточно большая величина внешних составляющих в бюджете погрешности – эфемеридной, тропосферной, ионосферной и т.п. Компенсация этих составляющих погрешности возможна за счет применения дифференциальных режимов работы ГНСС-приемников. В настоящее время одним из часто используемых способов увеличения точности определения местоположения является создание дифференциальных сетей различного уровня – региональных и локальных. Применение подобных технологий позволяет существенно, практически на порядок, улучшить точность измерения координат мобильного ГНСС-приемника. Однако основным условием функционирования дифференциальных сетей является наличие станций дифференциальной коррекции, координаты которых измерены с высокой точностью, как правило, при помощи астрономических методов. И даже в этих условиях погрешность измерения координат мобильных ГНСС-приемников на основе кодовых измерений составляет 20...30 см.

Одним из основных методов повышения точности навигационных определений при помощи ГНСС-приемников является применение дифференциальных методов Post Processing Kinematic (PPK) и Real Time Kinematic (RTK) [7–9]. Применение этих методов позволяет обеспечить погрешность измерения координат в единицы сантиметров, однако для их применения требуется наличие станций дифференциальной коррекции и организации канала передачи поправок. Сети, предоставляющие PPK- и RTK-решения, существуют на коммерческой основе, а также бесплатно в некоторых странах в рамках государственных геодезических сетей. Они охватывают значительные площади стран мира полем высокоточных поправок, однако в России сети дифференциальных станций в настоящее время развернуты не более чем в двух десятках регионов России. Северные и труднодоступные регионы России вообще не покрыты сетью станций дифференциальной коррекции. Это объясняется как крайне сложными условиями эксплуатации подобных станций – они должны функционировать в автоматическом необслуживаемом режиме в неблагоприятных условиях окружающей среды, так и сложностью организации радиоканалов передачи дифференциальных поправок – наземные виды радиосвязи в северных широтах не позволяют организовать стабильный канал связи, а российская система персональной спутниковой связи «Гонец» еще развернута не до конца. Кроме того, использование дифференциального режима работы ГНСС не решает основной проблемы применения БПЛА в составе группы – отсутствие взаимной навигации членов группы между собой.

2. Относительные методы измерения координат

Во многих сценариях группового применения БПЛА наиболее важным параметром является погрешность взаимной навигации членов группы между собой, от величины которой зависит и тактика их применения – плотность построения группы, степень автономности членов группы, возможность совместного целевого использования и т.п. Стоит учесть, что успешность функционирования группы БПЛА во многом зависит от точности позиционирования каждого объекта в ее составе, причем определяющую роль имеет не абсолютная точность измерения координат, а точность взаимной привязки отдельных объектов в группировке. В этом случае целесообразно применение относительных методов измерения навигационных параметров, позволяющих снизить доли внешних составляющих в общем бюджете погрешностей. Это такие виды погрешностей, как тропосферная, ионосферная, эфемеридная и другие, общие для близко расположенных ГНСС-приемников. Внешние составляющие погрешности определения псевдодальности характерны тем, что они не зависят от типа аппаратуры и в силу своей природы будут практически одинаковы для близко расположенных комплектов ГНСС-приемников (исключение составляет погрешность многолучевости, обуславливаемая конкретными условиями приема и, как правило, индивидуальная для каждого ГНСС-приемника). Отсюда вытекает принципиальная возможность значительного улучшения точности измерения координат в относительном режиме. В данном случае измерение абсолютных координат объектов осуществляется со стандартной точностью, а между собой они привязываются с гораздо меньшей погрешностью – единицы сантиметров [10, 11]. В качестве навигационного параметра используется разность псевдодальностей ΔR между двумя ГНСС-приемниками A_1 и A_2 от одних и тех же навигационных космических аппаратов (НКА) R_1 и R_2 (рис. 1).

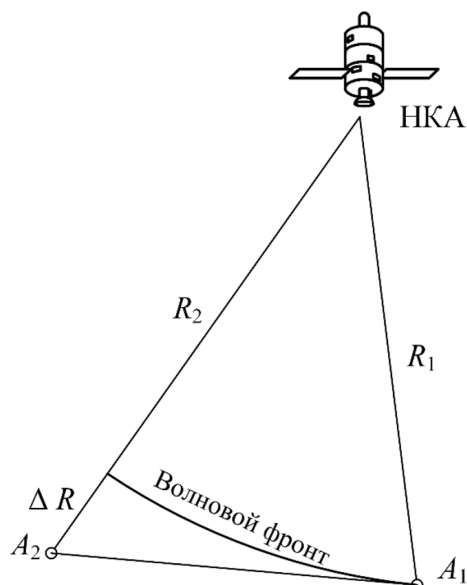


Рис. 1. К вопросу измерения относительных координат

Fig. 1. On the issue of measuring relative coordinates

Основным преимуществом методов взаимной навигации является отсутствие контрольно-корректирующих станций и необходимости в организации каналов связи с сетью Интернет. Можно выделить следующие методы относительных измерений:

- на основе кодовых измерений – при использовании этого метода производятся кодовые измерения в каждом из ГНСС-приемников. Затем, используя измеренные псевдодальности по каждому НКА в двух точках, можно составить разности псевдодальностей и непосредственно вычислить координаты объекта относительно опорной станции;

- на основе фазовых измерений – этот метод по своим принципам совпадает с относительным режимом на основе кодовых измерений, за исключением того, что при вычислениях используется фаза несущей частоты. В данном случае измерение абсолютных координат объекта осуществляется со стандартной точностью, тогда как объекты между собой привязываются с меньшей погрешностью – несколько миллиметров [12]. Однако фазовые режимы требуют разрешения фазовой неоднозначности, что серьезно ограничивает практическое применение этих методов.

Как показывают исследования [13], при кодовых измерениях относительный и дифференциальный режимы тождественны. Повышение точности измерения координат возможно только при переходе к фазовым измерениям. Основной проблемой фазовых измерений является их неоднозначность, вызванная тем, что фазовый сдвиг сигналов измеряется в пределах периода сигнала, а разность хода может многократно превышать длину волны сигналов НКА [11]. Проблема усугубляется тем, что некоторая реальная разность фазовых измерений (включающая неоднозначность фазовых отсчетов) наблюдается двумя комплектами аппаратуры, имеющими различные задержки в трактах приема и обработки сигналов НКА, а также различные шкалы времени, формируемые опорными генераторами каждого комплекта аппаратуры, относи-

тельно которых производятся измерения фазовых псевдодальностей. Необходимо учесть, что указанные методы относительных измерений все равно требуют наличия опорной станции, производящей непрерывные измерения, так как определяется разность координат между ней и объектом, что не всегда реализуемо в условиях высокой динамики движения объектов.

Кроме того, одна из основных проблем реализации подобных режимов работы – это необходимость организации каналов связи. Как показывают исследования [14], объем данных, передаваемых с одного БПЛА на другой, составит 515 байт при условии, что число наблюдаемых НКА будет 18. При условии достаточно большой группы БПЛА (12 и более) общий объем информации при приеме и передаче может составить до 12 360 байт, что существенно увеличивает нагрузку на оборудование БПЛА.

3. Измерение взаимных координат ГНСС-приемников с использованием единого созвездия навигационных космических аппаратов

Для устранения недостатков дифференциальных и относительных режимов, связанных с необходимостью организации каналов связи между членами группы, большой вычислительной сложностью алгоритмов при большом количестве БПЛА в группе, предлагается упрощенный метод измерения взаимных координат, заключающийся в использовании ГНСС-приемниками при решении навигационной задачи и расчете взаимных координат единого созвездия НКА. Ключевая особенность метода заключается в том, что для двух близко расположенных ГНСС-приемников, использующих одно и то же созвездие НКА, сигналы которых применяются при решении навигационной задачи, суммарные погрешности определения псевдодальностей практически идентичны. Это приводит к тому, что оба ГНСС-приемника испытывают схожие смещения при определении своих координат, что улучшает точность определения взаимных координат при резком снижении требований к вычислительным ресурсам и каналу связи – в составе передаваемых данных достаточно передать состав используемого созвездия НКА и координаты ГНСС-приемника, измеренные в автономном режиме. Причем возможно несколько подходов для организации взаимной навигации БПЛА внутри группы:

- определение координат всех членов группы относительно лидера;
- разбиение группы на подгруппы и определение координат членов подгруппы относительно ее лидера, лидеров подгрупп – относительно друг друга;
- определение координат всех членов группы относительно друг друга по принципу «каждый с каждым».

Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки. Определение взаимных координат членов группы по принципу «каждый с каждым» минимизирует погрешность измерения координат за счет усреднения большого количества измерений – каждый член группы позиционируется не только относительно лидера, но и других членов группы. Кроме того, данный метод позволяет формировать более плотные группы с минимальными расстояниями между ее членами, достаточно просто может быть реализована возможность оперативной реконфигурации группы – смена лидера, переназначение ролей участников группы и т.п. Однако при этом существенно возрастают требования к вычислительным ресурсам и каналам связи. Определение координат всех членов группы относительно лидера, наоборот, минимизирует

требования к вычислительным ресурсам и каналу связи, однако отдельные члены группы позиционируются только относительно лидера, что требует формирования более рассеянной группы для исключения летных происшествий.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований предложенного метода. В ходе эксперимента были использованы два ГНСС-приемника, программное обеспечение которых способно выдавать внешним потребителям «сырые» данные – измеренные псевдодальности по каждому НКА. Координаты ГНСС-приемников в геоцентрической системе координат, полученные усреднением измеренных координат на протяжении суток, были равны: для первого ГНСС-приемника – $X_1 = -171826,53$ м, $Y_1 = 3572212,66$ м, $Z_1 = 5263720,62$ м; для второго ГНСС-приемника – $X_2 = -171833,76$ м, $Y_2 = 3572208,83$ м, $Z_2 = 5263720,47$ м. разность координат между ГНСС-приемниками составила – $\Delta X = 7,23$ м, $\Delta Y = 3,83$ м, $\Delta Z = 0,15$ м. Расстояние между ГНСС-приемниками составляет $L = 8,18$ м.

При помощи внешнего устройства производилась запись измеренных псевдодальностей по НКА ГЛОНАСС в количестве $N = 5000$ измерений, а затем – решение навигационной задачи с использованием как псевдодальностей, измеренных по каждому НКА, так и псевдодальностей, измеренных по НКА, являющихся общими для обоих ГНСС-приемников. На рис. 2 показаны результаты измерений разности координат ΔX между ГНСС-приемниками, на рис. 3 – разность координат ΔZ между ГНСС-приемниками, а на рис. 4 – результаты измерения расстояния L между ними, рассчитанные по автономным измерениям (красные кривые) и с использованием предложенного метода – единого созвездия НКА (черные кривые).

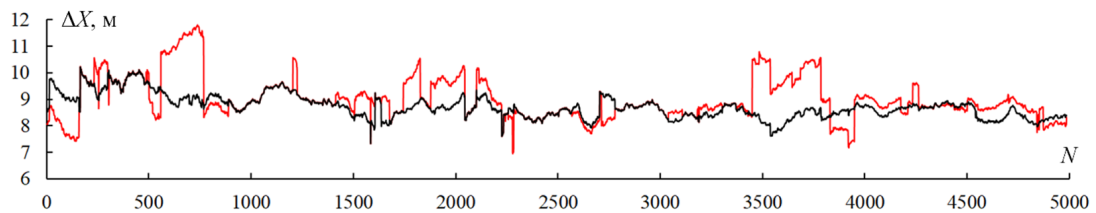


Рис. 2. Результаты измерения ΔX по автономным измерениям (красным) и с использованием единого созвездия НКА (черным)

Fig. 2. Results of ΔX measurement using autonomous measurements (red) and using a single constellation of navigation spacecraft (black)

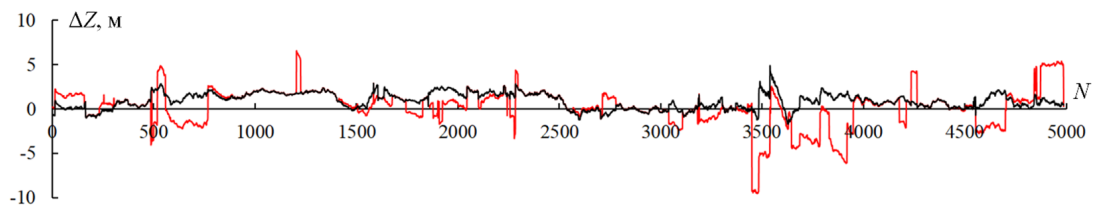


Рис. 3. Результаты измерения ΔZ по автономным измерениям (красным) и с использованием единого созвездия НКА (черным)

Fig. 3. Results of ΔZ measurement using autonomous measurements (red) and a single constellation of navigation spacecraft (black)

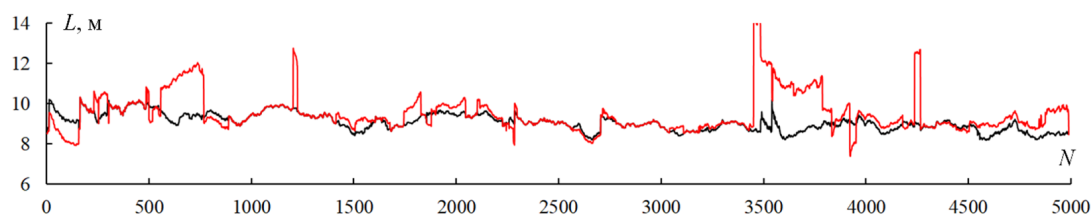


Рис. 4. Результаты измерения L по автономным измерениям (красным) и с использованием единого созвездия НКА (черным)

Fig. 4. Results of L measurement based on autonomous measurements (red) and using a single constellation of navigation spacecraft (black)

По результатам измерений видно, что использование единого созвездия НКА для ГНСС-приемников существенно уменьшает погрешность измерения навигационных параметров. Анализируя графики на рис. 2–4, можно заметить, что при использовании координат, измеренных ГНСС-приемниками автономно (красные кривые), наблюдаются синхронные по отдельным разностям координат скачкообразные изменения, вызываемые различием созвездий НКА, сигналы которых ГНСС-приемники используют для решения навигационной задачи. Использование ГНСС-приемниками одинакового созвездия НКА для решения навигационной задачи исключает подобные скачки. Такое уменьшение погрешности подтверждается и статистическими характеристиками результатов измерений разностей координат ГНСС-приемников ΔX , ΔY , ΔZ и расстояния между ними L , которые приведены в табл. 1.

Анализируя данные табл. 1, можно заметить, что СКО измерений уменьшается практически в два раза, количество и амплитуда выбросов измеренных значений также резко уменьшились. Математические ожидания значений взаимных координат и расстояния между ГНСС-приемниками, измеренные с использованием единого созвездия НКА, приближаются к истинным значениям. В табл. 2 показаны результаты расчета коэффициента взаимной корреляции между измеренными ГНСС-приемниками значениями координат, которые показывают, что использование одинакового созвездия НКА при решении навигационной задачи

Таблица 1. Статистические характеристики результатов измерений

Table 1. Statistical characteristics of measurement results

Характеристика	Измерения с использованием автономных координат, м				Измерения с использованием единого созвездия НКА, м			
	ΔX	ΔY	ΔZ	L	ΔX	ΔY	ΔZ	L
Математическое ожидание	9,00	1,78	0,29	9,48	8,72	2,08	0,95	9,08
СКО	0,80	1,26	2,04	0,92	0,45	0,64	0,89	0,43
Минимальное значение	6,94	–2,50	–9,51	7,38	7,34	0,34	–1,66	8,17
Среднее значение в 25 % измерений	8,52	1,25	–0,43	8,93	8,41	1,63	0,24	8,79
Среднее значение в 50 % измерений	8,81	1,90	0,52	9,23	8,68	2,05	0,96	9,05
Среднее значение в 75 % измерений	9,46	2,28	1,46	9,80	8,94	2,43	1,69	9,40
Максимальное значение	11,81	7,22	6,58	14,22	10,23	4,64	4,87	10,33

Таблица 2. Коэффициенты взаимной корреляции измеренных координат

Table 2. Cross-correlation coefficients of measured coordinates

Измерения с использованием автономных координат				Измерения с использованием единого созвездия НКА			
	X_2	Y_2	Z_2		X_2	Y_2	Z_2
X_1	0,8613	–	–	X_1	0,9812	–	–
Y_1	–	0,9201	–	Y_1	–	0,9838	–
Z_1	–	–	0,7377	Z_1	–	–	0,9616

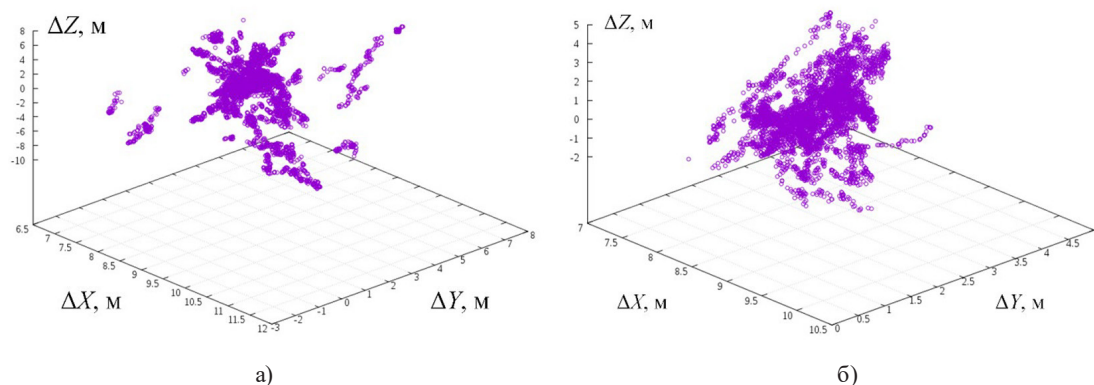


Рис. 5. Результаты измерения взаимных координат ΔX , ΔY между двумя ГНСС-приемниками: *a* – при измерении ГНСС-приемниками собственных координат автономно; *б* – при измерении ГНСС-приемниками собственных координат с использованием единого созвездия НКА

Fig. 5. Results of measuring mutual coordinates ΔX , ΔY between two GNSS receivers: *a* – when GNSS receivers measure their own coordinates autonomously; *б* – when GNSS receivers measure their own coordinates using a single constellation of navigation spacecraft

ГНСС-приемниками существенно уменьшает систематическую погрешность измерения координат, вызванную внешними по отношению к ГНСС-приемнику факторами.

На рис. 5 показаны результаты измерения взаимных координат ΔX , ΔY между двумя ГНСС-приемниками. Из рисунка видно, что использование ГНСС-приемниками единого созвездия существенно уменьшает погрешность измерения взаимных координат, что позволяет применять БПЛА в составе организованных групп, не требующих сантиметровой точности привязки их между собой. Это такие возможные применения, как ведение групповой разведки, мониторинг стихийных бедствий, проведение поисково-спасательных работ, доставка грузов, патрулирование удаленных площадных и протяженных объектов и т.п.

Заключение

Таким образом, в настоящее время наблюдается бурное развитие БПЛА, которые применяются во многих областях хозяйственной деятельности. При этом все чаще БПЛА применяются в составе организованных групп, позволяющих существенно повысить эффективность их применения и получить возможный синергетический эффект. Одной из основных проблем, требующей решения для организации действий БПЛА в составе групп, является их навига-

ционное обеспечение. Причем наиболее важна точность измерения не абсолютных координат каждого БПЛА в составе групп, а их взаимная привязка между собой. Снижение погрешности измерения взаимных координат между членами группы БПЛА позволит формировать более плотные строи, уменьшить вероятность летных происшествий, осуществлять мониторинг и картографирование больших территорий, выполнять поиск и локализацию объектов, распределять задачи между членами группы, реализовывать бесшовное сложение оптических изображений при совместном обследовании земной поверхности и т.п.

Существующие методы навигационного обеспечения БПЛА в подавляющем большинстве случаев основаны на использовании ГНСС-приемников. Снижение погрешности навигационных определений в этом случае основано на использовании дифференциальных режимов их работы, что требует организации каналов связи для передачи дифференциальных поправок, увеличения вычислительной сложности алгоритмов решения навигационной задачи. При этом стоит заметить, что и в этом случае каждый БПЛА в составе группы позиционируется без учета местоположения других членов группы.

Рассмотренный в настоящей статье метод измерения взаимных координат с использованием всеми ГНСС-приемниками БПЛА единого созвездия НКА практически не усложняет алгоритмы решения навигационной задачи, не предъявляет жестких требований к каналу передачи данных. Лидеру группы достаточно передавать информацию о собственных измеренных координатах и состав созвездия НКА, сигналы которых используются для решения навигационной задачи. Результаты экспериментальных исследований предложенного метода показали, что, несмотря на простоту его реализации, его применение уменьшает СКО измерения взаимных координат ГНСС-приемников примерно в два раза, устраняются скачкообразные их изменения, вызываемые различием созвездий НКА.

Дальнейшее снижение погрешности измерения взаимных координат возможно в направлении совершенствования принципов организации взаимной навигации БПЛА внутри группы:

- определение координат всех членов группы относительно лидера;
- разбиение группы на подгруппы и определение координат членов подгруппы относительно ее лидера, лидеров подгрупп – относительно друг друга;
- определение координат всех членов группы относительно друг друга по принципу «каждый с каждым».

Список литературы / References

- [1] Al-zahrani B., Oubbati Omar Sami, Barnawi A., Atiquzzaman Mohammed, Alghazzawi D. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, 166 (1).
- [2] Kurochkin S. Yu., Tachkov A. A. Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots (a Review). *Mechatronics, Automation, Control*, 2021, 22(6), 304–312.
- [3] Селин А.И., Туркин И.К. Обзор целевых объектов применения беспилотных летательных аппаратов, работающих в составе группы. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, 2023, 26(2), 91–105. [Selin A. I., Turkin I. K. Review of Target Objects for the Group-Operated Unmanned Aerial Vehicles Application. *Civil Aviation High Technologies*, 2023, 26 (2), 91–105 (in Rus.).]

- [4] Jin P.F., et al. Optimal formation control for quadrotors with collision avoidance based on dynamic constraints. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1215(1).
- [5] Дьяченко А. А. Задача формирования строя в группе БПЛА. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2012, 3 (128). 22–30. [Dyachenko A. A. The Task of Forming Structure in Group of UAVs. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2012, 3(128), 22–30 (in Rus.)].
- [6] Tong P., et al. Multi-UAV Collaborative Absolute Vision Positioning and Navigation: A Survey and Discussion. *Drones*, 2023, 7(261).
- [7] Li X., Huang J., Li X., et al. Review of PPP–RTK: achievements, challenges, and opportunities. *Satell Navig*, 2022, 3(28).
- [8] Wang J., Xu T., Nie W., Xu G. GPS/BDS RTK Positioning Based on Equivalence Principle Using Multiple Reference Stations. *Remote Sens*, 2020, 12(19), 3178.
- [9] Fan P., Li W., Cui X., Lu M. Precise and Robust RTK-GNSS Positioning in Urban Environments with Dual-Antenna Configuration. *Sensors*, 2019. 19, 3586.
- [10] Dmitriev D.D., Tyapkin V.N., Gladyshev A.B., et al. The Use of Antenna Arrays to Improve the Accuracy of GNSS Receivers. *2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2022.
- [11] Fateev Yu.L., Dmitriev D.D., V.N. Tyapkin, et al. The phase ambiguity resolution in the angle-measuring navigation equipment. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1611, pp. 12–14.
- [12] Dmitriev D.D., Tyapkin V.N., Fateev Yu.L., Gladyshev A.B., Zverev P. Yu. Methods of High-Precision Mutual Navigation of Small Spacecraft. *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2020.
- [13] Дмитриев Д.Д., Тяпкин В.Н., Фатеев Ю.Л. [и др.] Методы взаимной высокоточной навигации, основанные на использовании относительных режимов работы угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. *Космические аппараты и технологии*, 2022, 2(40), 123–132. [Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Fateev Yu. L. Methods of Mutual High-Precision Navigation Based the Use of Relative Modes of Anglemeasuring Receivers of Global Navigation Satellite Systems Signals. *Spacecrafts & Technologies*, 2022, 2(40), 123–132 (in Rus.)].
- [14] Ratushnyak V.N., Gladyshev A.B., Kremez N.S., et al. Organization of Mutual High-Precision Navigation of Small Spacecraft of Low-Orbit Groups. *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2020.

**Math Modeling.
Numerical Experiment**

**Математическое
моделирование.
Численный
эксперимент**

EDN: CFUPNV

УДК 621.373.826

Efficiency of the Algorithm for Previous Detection of the State of a Transmitting Laser Means Based on Reception and Analysis of Non-Stationary Pre-Generation Spontaneous Radiation

Anton A. Koziratsky^a,

Evgeny M. Shutko^{b*} and Anton A. Barkalov^b

^a*Center for Special Research and Development of JSC “STC REB”*

^b*Military Education and Research Centre*

of Military-Air Forces «Military-Air Academy

Named After Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin»

Voronezh, Russian Federation

Received 02.03.2025, received in revised form 04.05.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. An algorithm for detecting a useful signal by an optical receiver, which is a non-stationary radiation increasing over a certain interval in Poisson noises of a stationary nature, is proposed. The efficiency of the algorithm is estimated taking into account the implementation of the process of weighted summation of the received input signal, which is an additive mixture of useful and noise radiation in the accumulation mode. Analytical expressions are obtained with an estimate of the main characteristics (average and dispersion), summed non-uniform weighted readings from the adder output and the distribution function of the pre-threshold effect for various hypotheses. For the case under consideration, the conditional probabilities of correct detection of a false alarm are estimated.

Keywords: laser radiation, detection of pre-generation radiation, non-stationary spontaneous radiation detector, spontaneous radiation, spontaneous-inductive radiation.

Citation: Koziratsky A. A., Shutko E. M., Barkalov A. A. Efficiency of the Algorithm for Previous Detection of the State of a Transmitting Laser Means Based on Reception and Analysis of Non-Stationary Pre-Generation Spontaneous Radiation. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 510–528. EDN: CFUPNV



Эффективность алгоритма упреждающего обнаружения состояния передающего лазерного средства на основе приема и анализа нестационарного предгенерационного спонтанного излучения

А. А. Козирацкий^а, Е. М. Шутько^б, А. А. Баркалов^б

^аЦентр специальных исследований и разработки АО «НТЦ РЭБ»

^бВоенный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Российская Федерация, Воронеж

Аннотация. Предложен алгоритм обнаружения оптическим приемником полезного сигнала, представляющего собой нестационарное, возрастающее на некотором интервале излучение в пуассоновских шумах, имеющих стационарный характер. Оценена эффективность алгоритма с учетом реализации процесса взвешенного суммирования принимаемого входного сигнала, представляющего аддитивную смесь полезного и шумового излучений в режиме накопления. Получены аналитические выражения с оценкой основных характеристик (среднего и дисперсии) суммированных неравномерных взвешенных отсчетов с выхода сумматора и функции распределения предпорогового воздействия для различных гипотез. Для рассматриваемого случая оценены условные вероятности правильного обнаружения ложной тревоги.

Ключевые слова: лазерное излучение, обнаружение предгенерационного излучения, обнаружители нестационарного спонтанного излучения, спонтанное излучение, спонтанное-индукционное излучение.

Цитирование: Козирацкий А. А. Эффективность алгоритма упреждающего обнаружения состояния передающего лазерного средства на основе приема и анализа нестационарного предгенерационного спонтанного излучения / А. А. Козирацкий, Е. М. Шутько, А. А. Баркалов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 510–528. EDN: CFUPNV

Введение

Во многих случаях, часто встречающихся на практике, возникает острая необходимость обнаружения сигналов, исходящих от радиоэлектронных средств (РЭС), находящихся в процессе перехода из одного состояния (режима) в другое. Это обусловлено необходимостью качественного контроля исследуемых радиоэлектронных средств, дистанционного их мониторинга в группировках, радиоэлектронных средств, которые находятся в составе сложноиерархических систем. Как правило, излучения РЭС в переходных режимах до перехода в номинальный режим генерации сигнала представляет собой внеполосное и побочное излучение, характеризующееся явно выраженной нестационарностью. Все это в полной мере относится к передающим лазерным средствам, работающим в различных режимах и осуществляющим переход из некоторого исходного (выключенного) состояния в состояние генерации электромагнитного излучения с использованием различных способов модуляции добротности резонатора. Особенностью формирования излучений в лазерных средствах в ходе переходных процедур является наличие действий по накоплению энергии в активном элементе, а также его нагрев (при выходе на необходимый температурный уровень, а впоследствии и температурная стабилизация) при выходе на режим генерации, что порождает ИК-излучение активной среды, излучение системы оптической накачки, спонтан-

ное и спонтанно-индуцированное излучения, соответствующие различным энергетическим переходам активной среды, количество которых может быть значительным [1–5]. Наибольшей интенсивностью обладают чисто спонтанные и спонтанно-индуцированные излучения особенно в твердотельных лазерах с модуляцией добротности резонатора [6,7], а также подобные процессы аналогично проявляются и в волоконных лазерах с торцевой, с торцевой и одновременно боковой накачкой, с использованием полупроводниковых лазеров.

Повышение вероятности обнаружения спонтанного, спонтанно-индуцированного лазерного излучения возможно за счет использования в качестве полезного сигнала части спонтанно-индуцированного излучения, расположенного по времени ближе к моменту начала генерации основного излучения. Однако в ряде случаев возникает необходимость в более раннем обнаружении спонтанно-индуцированного излучения с тем, чтобы увеличить интервал времени от момента обнаружения до момента прихода (или генерации) основного излучения. Этот интервал можно рассматривать как располагаемое время, которое необходимо для подготовки и проведения определенных измерительных или других действий с использованием устройств, сопряженных с обнаружением указанных излучений [8–11]. Очевидно, что чем больше располагаемое время, тем более универсальным становится лазерный обнаружитель и тем более высокой устойчивости и эффективности можно достичь от сопрягаемых устройств, для которых лазерный обнаружитель выступает в качестве источника информации. Смещение процедуры обнаружения в более ранний период времени приводит к тому, что рассматриваемый полезный сигнал (спонтанное излучение) становится заметно слабее, что приводит к необходимости увеличения длительности интервала накопления сигнала в приемнике лазерного обнаружителя. В свою очередь, увеличение длительности интервала накопления в некоторой степени сокращает располагаемое время, что может негативно сказаться на эффективности функционирования сопрягаемого с лазерным обнаружителем устройства.

Исходя из вышесказанного, *целью данной работы* является разработка алгоритма устойчивого обнаружения спонтанного излучения с заданными условными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, обеспечивающего при этом максимальное значение длительности располагаемого времени.

Для достижения указанной цели вначале рассмотрим задачу обнаружения спонтанного излучения как нестационарного сигнала с формой, отражающей его амплитудное увеличение, и с процедурой его накопления в приемном устройстве при произвольном выборе момента начала процесса накопления.

Обоснование формы и основных характеристик предгенерационных спонтанных излучений лазерных средств

В ходе экспериментальных и теоретических исследований [5, 6, 12] по определению характеристик предгенерационных лазерных каналов основное внимание было сосредоточено на спонтанных излучениях, излучении накачки и ИК-излучениях оптических элементов передающего лазерного средства. При этом полученные количественные результаты представлялись в виде характерных энергетических, пространственно-временных и амплитудно-временных параметров.

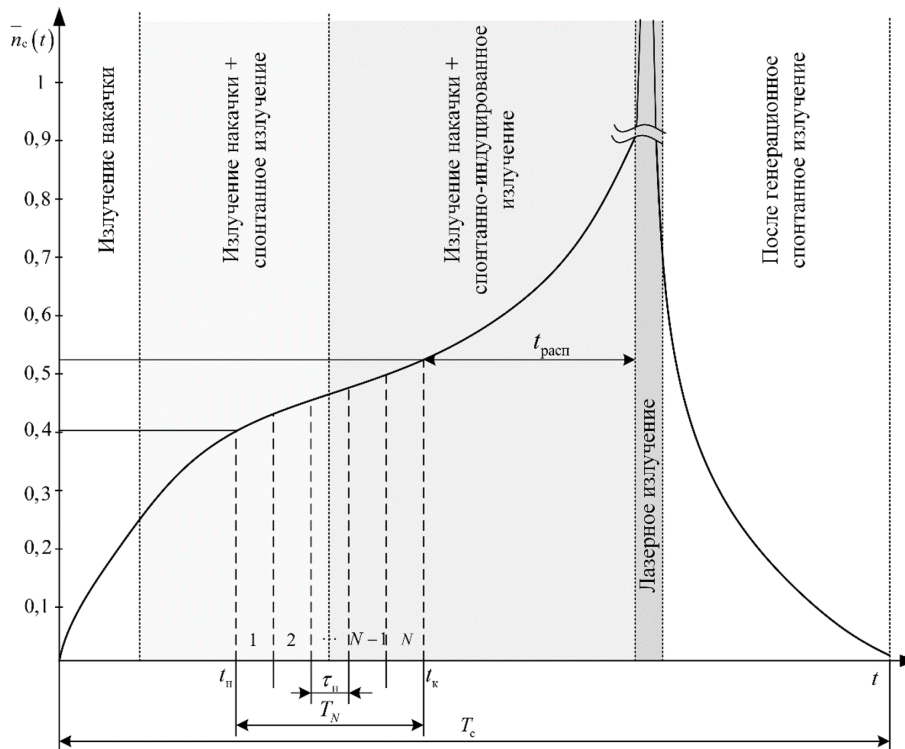


Рис. 1. Динамика формирования предгенерационного и послегенерационных излучений лазерного средства с модуляцией добротности, в том числе на фоне интервала наблюдения длительностью T_N .

Fig. 1. Dynamics of formation of pre-generation and post-generation radiation of a Q-modulated laser device, including against the background of an observation interval of duration T_N

Так на рис. 1 представлен типовой, показательный график зависимостей интенсивности излучения на выходе передающего лазерного канала, работающего в режиме модуляции добротности резонатора, когда в качестве модуляторов используются электрооптические системы.

Форма такого сложного сигнала (излучения) может считаться частично известной. Однако если период наблюдения $T_N \ll T_c$ (где T_c – полная длительность излучения), то в связи с неопределенностью выбора моментов времени начала и завершения наблюдения (части такого составного сигнала) форма принимаемого сигнала будет в общем случае неизвестной. Можно предположить, что с использованием информации об основном генерируемом сигнале (гигантском импульсе) рассматриваемое излучение до появления основного сигнала будет нарастающим, а по завершении генерации будет спадающим. Кроме того, предгенерационное и послегенерационное спонтанные излучения имеют достаточно выраженный дискретный оптический спектр, составляющие которого по-разному изменяют свои амплитудные характеристики во времени. При избирательном приеме и анализе составляющие такого спектра в общем случае будут неизвестными, так как для случая предгенерационных излучений некоторые оптические составляющие спектра в течение этого периода могут как увеличивать свои амплитудные характеристики до определенной величины, так и уменьшать их в момент, когда начинают доминировать спонтанно-индуцированные переходы [12, 13].

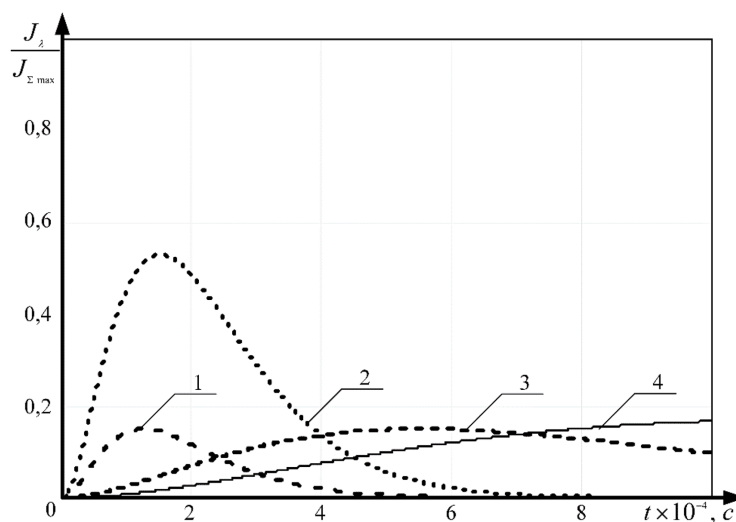


Рис. 2. Временное распределение спонтанного излучения в зависимости от длины волны: 1 – для перехода с $\lambda=0,91$ мкм; 2 – для основного лазерного перехода с $\lambda=1,06$ мкм; 3 – для перехода с $\lambda=1,34$ мкм; 4 – для перехода с $\lambda=1,9$ мкм

Fig. 2. Temporal distribution of spontaneous emission depending on the wavelength: 1 – for the transition with $\lambda=0,91$ μm ; 2 – for the main laser transition with $\lambda=1,06$ μm ; 3 – for the transition with $\lambda=1,34$ μm ; 4 – for the transition with $\lambda=1,9$ μm

На рис. 2 представлены амплитудно-временные (с учетом усредненных значений вероятности выбора нижнего энергетического уровня при спонтанном излучении) зависимости спонтанных излучений на длинах волн 0,91 мкм, 1,06 мкм, 1,34 мкм и 1,9 мкм от относительного значения времени ($t/t_{\text{п}}$, где $t_{\text{п}}$ – время достижений пикового значения мощности, рассеиваемой в лампе накачки) [5].

Для представленных на рис. 2 результатов предгенерационные спонтанные излучения соответствуют интервалу от начала координат до момента времени, когда зависимость 2, описывающая интенсивность излучения на основной длине волны ($\lambda=1,06$ мкм), примет максимальное значение (момент времени включения модулятора добротности).

Следует отметить, что полученные амплитудно-временные зависимости излучения на выходе передающего канала получены при неполном резонаторе, когда модулятор добротности находится в состоянии постоянного обеспечения минимального значения коэффициента отражения. В этом случае предгенерационные спонтанные излучения будут формироваться до момента времени достижения интенсивностей максимального значения, что соответствует моменту включения модулятора добротности резонатора.

По итогам обобщения и анализа результатов исследования характеристик и параметров спонтанных, спонтанно-индуцированных излучений можно сделать вывод.

1. Амплитудно-временная зависимость рассматриваемых излучений, от момента накачки до момента генерации основного излучения, имеет возрастающий характер с явно выраженной нелинейностью на этапе формирования спонтанно-индуцированного излучения.

2. Предгенерационное спонтанное излучение может быть условно разделено на два излучения – чисто спонтанное излучение и спонтанно-индуцированное излучение.

3. С увеличением плотности инверсной населенности происходит изменение роста абсолютных значений спонтанных излучений из-за различных ускорений изменений, связанных с одновременным влиянием коэффициентов Эйнштейна для вынужденных переходов и значений вероятностей спонтанных переходов между уровнями в единицу времени.

4. Абсолютные значения интенсивностей спонтанных излучений обеспечивают устойчивое их обнаружение в типовых условиях фоновое излучения на дальностях, в некоторых случаях, превышающих дальность действия исследуемых лазерных средств [5].

Алгоритм обнаружения спонтанного предгенерационного излучения

Применительно к ситуации, представленной на рис. 1, отражающей общую форму сигнала и расположение выделенной наблюдаемой «посылки» T_N , которая разбита на N подынтервалов одинаковой длительностью τ_n . Поступая аналогично [14, 15], будем считать, что в течение длительности подынтервала τ_n наблюдается возрастающее по интенсивности (фотоэлектронов/секунду) обнаруживаемое излучение, так что интенсивность излучения в i -ом подынтервале запишется в виде γ_{ci} , где $i = 1, 2, \dots, N$. При этом шумовая помеха предполагается стационарной с постоянной интенсивностью $\gamma_{шi} = \gamma_{ш}$ для всех $i = 1, 2, \dots, N$.

Приемник анализирует реализацию на интервале $[t_n; t_k]$ длительностью T_{N0} , где t_n, t_k – начальный и конечный момент времени анализа (накопления) соответственно. При этом после каждого интервала длительностью τ_n «берется» отсчет. В связи с этим число отсчетов в выборке равно N . Величина отсчетов в выборке равна числу фотоэлектронов, подсчитываемых приемником в течение длительности τ_n . Решение принимается после последовательного накопления всех N отсчетов [16].

Предположим, что отсчеты в подынтервалах статистически независимы, а решая задачу обнаружения, будем считать, что сигнал слабый и, следовательно, подчинен пуассоновской статистике. Также будем считать, что приемник работает по правилу Неймана–Пирсона с квантовым счетчиком в качестве чувствительного элемента.

С учетом изложенного имеющаяся на входе приемника выборка из реализации $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N$ отождествляется с наличием сигнала в том случае, если выполняется неравенство [14, 15],

$$\lambda(n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N) = \frac{P_1(n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N)}{P_0(n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N)} \geq \lambda_0 \quad (1)$$

или отождествляется с наличием лишь шума, если $\lambda < \lambda_0$, где P_1 – совместная плотность вероятности для совокупности выборочных значений $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N$ при условии, что сигнал присутствует; P_0 – совместная плотность вероятности для той же совокупности выборочных значений при условии, что сигнала нет; λ_0 – пороговая величина, которая выбирается из условия выполнения неравенства $\lambda \geq \lambda_0$ при отсутствии сигнала и фиксированном значении условной вероятности ложных тревог $P_{лт}$.

Процесс отождествления выборки удобно увязать с гипотезами, гипотеза H_0 соответствует случаю, когда на вход приемника поступает лишь помеховое излучение, а гипотеза H_1 соответствует случаю, когда на вход приемника поступает аддитивная смесь полезного (обнаруживаемого) сигнала и помехи.

Для сделанного предположения, что выборочные значения статистически независимы, выражение можно представить в виде:

$$\lambda = \prod_{i=1}^N \frac{P_1(n_i)}{P_0(n_i)} \geq \lambda_0, \quad (2)$$

где $P_1(n_i)$ и $P_0(n_i)$ – плотности вероятности i -ых выборочных значений соответственно при наличии и отсутствии сигнала. Следовательно, при $\lambda \geq \lambda_0$ принимается гипотеза H_1 , в противном случае гипотеза H_0 .

Введем в рассмотрение среднее число сигнальных фотоэлектронов за время i -го отсчета ($\bar{S}_{ci}$) и среднее число шумовых фотоэлектронов за время i -го отсчета ($\bar{S}_{m_i}$), определив их как:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{ci}(t) &= \frac{1}{\tau} \int_{t_i}^{t_i+\tau} \gamma_c(t) dt \\ \bar{S}_{m_i}(t) &= \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \gamma_m(t) dt, \end{aligned} \quad (3)$$

где γ_{ci} – интенсивности потока сигнальных фотоэлектронов в выборке; γ_m – интенсивности i потока шумовых фотоэлектронов в выборках ($\gamma_{mi} = \gamma_m$).

Тогда с учетом и сделанных предположений можем записать, что

$$P_1(n_i) = \frac{(\bar{S}_{ci} + \bar{S}_{m_i})^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-(\bar{S}_{ci} + \bar{S}_{m_i})} \quad (4)$$

$$P_0(n_i) = \frac{\bar{S}_{m_i}^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\bar{S}_{m_i}}. \quad (5)$$

Подставляя и в получим:

$$\lambda = \prod_{i=1}^N \left(\frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_{m_i}} + 1 \right)^{n_i} e^{-\bar{S}_{ci}} \geq \lambda_0. \quad (6)$$

Логарифмируя и вводя обозначения $\Lambda = \ln \lambda$ находим:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \left[n_i \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_{m_i}} \right) - \bar{S}_{ci} \right] \geq \ln \lambda_0 \quad (7)$$

Выражение позволяет представить структуру оптимального приемника-обнаружителя спонтанного излучения лазерного средства в виде, представленном на рис. 3.

Оптимальный приемник последовательного накапливает все взвешенные отсчеты, при этом коэффициент взвешивания для каждого отсчета свой и определяется разностью $\ln(\bar{S}_{m_i} + \bar{S}_{ci}) - \ln \bar{S}_{m_i}$, после чего на основании сравнения с пороговым значением принимается решение о наличии или отсутствии спонтанного излучения в принятом сигнале. Величина порога может быть предварительно оценена из выражения $\ln \lambda + \sum_{i=1}^N \bar{S}_{ci}$.

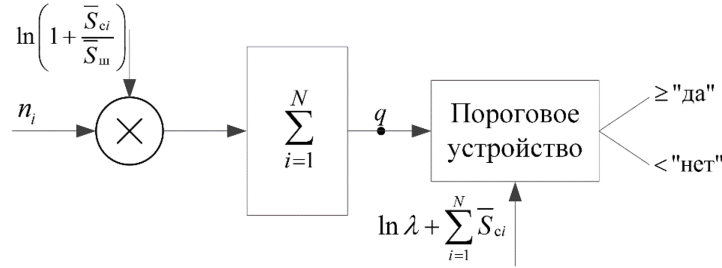


Рис. 3. Оптимальная схема приемника обнаружителя нестационарного спонтанного излучения передающего канала лазерного средства с последовательным накоплением импульсов

Fig. 3. Optimal circuit of the receiver of the detector of non-stationary spontaneous radiation of the transmitting channel of a laser device with sequential accumulation of pulses

Оценка эффективности алгоритма

Для исследования на эффективность алгоритма обнаружения, структура которого представлена на рис. 3, определим статистику сигнала в точке q (рис. 3). Введем в рассмотрение величину $q = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \ln\left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right)$. Будем полагать, что значение q в силу центральной предельной

теоремы «нормализуется» в одноименной обозначенной точке как взвешенный накопленный сигнал для последующего выбора гипотез H_1 (есть обнаруживаемый сигнал) или гипотезы H_0 (нет обнаруживаемого сигнала). Тогда для гипотезы H_1 среднее значение рассматриваемого сигнала в точке q .

$$\begin{aligned} \langle q \rangle_{H_1} &= \sum_{n_i=0}^{\infty} q P_1(n_i) = \sum_{n_i=0}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^N n_i \cdot \ln\left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right) \right) \frac{(\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m)^{n_i}}{n_i!} e^{-(\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m)} = \\ &= \sum_{i=1}^N (\bar{S}_m + \bar{S}_{ci}) \cdot \ln\left(\frac{\bar{S}_m + \bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right) = \sum_{i=1}^N (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \cdot \ln\left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Дисперсию определим как сумму дисперсий каждого отсчета, которая для одного отсчета определяется как

$$\begin{aligned} \sum_{n_i=0}^{\infty} (n_i - \bar{S}_{ci} - \bar{S}_m)^2 \ln^2\left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right) \frac{(\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m)^{n_i}}{n_i!} e^{-(\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m)} = \\ = (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \ln^2\left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда дисперсия последовательно накопленного сигнала (применительно к точке q)

$$\sigma_{qH_1}^2 = \sum_{i=1}^N (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \ln^2\left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m}\right). \quad (10)$$

Среднее значение и дисперсия последовательного накопленного сигнала применительно к гипотезе H_0 будет определяться с помощью следующих выражений.

$$\langle q \rangle_{H_0} = \sum_{n_i=0}^{\infty} q P_0(n_i) = \bar{S}_m \sum_{i=1}^N \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right). \quad (11)$$

$$\sigma_{qH_0}^2 = \sum_{i=1}^N \bar{S}_m \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right). \quad (12)$$

Введем в рассмотрение плотности вероятности величин амплитуд сигналов, в точке q при гипотезе H_0 и H_1 в виде:

$$f(q/H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{qH_0}} e^{-\frac{(q - \langle q \rangle_{H_0})^2}{2\sigma_{qH_0}^2}}, \quad (13)$$

$$f(q/H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{qH_1}} e^{-\frac{(q - \langle q \rangle_{H_1})^2}{2\sigma_{qH_1}^2}}. \quad (14)$$

С использованием выражений и можем записать аналитическое выражение для оценки условных вероятностей правильного обнаружения и наступления ложной тревоги при наблюдении приемником входного воздействия в течение интервала времени T_N .

$$P_{обн} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{qH_1}} \int_{q_n}^{\infty} e^{-\frac{(q - \langle q \rangle_{H_1})^2}{2\sigma_{qH_1}^2}} dq = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{q_n - \langle q \rangle_{H_1}}{\sigma_{qH_1}}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - \Phi \left(\frac{q_n - \langle q \rangle_{H_1}}{\sigma_{qH_1}} \right). \quad (15)$$

$$P_{лт} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{qH_0}} \int_{q_n}^{\infty} e^{-\frac{(q - \langle q \rangle_{H_0})^2}{2\sigma_{qH_0}^2}} dq = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{q_n - \langle q \rangle_{H_0}}{\sigma_{qH_0}}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - \Phi \left(\frac{q_n - \langle q \rangle_{H_0}}{\sigma_{qH_0}} \right). \quad (16)$$

Подставим в и зна

$$P_{обн} = 1 - \Phi \left(\frac{q_n - \sum_{i=1}^N (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}} \right). \quad (17)$$

$$P_{лт} = 1 - \Phi \left(\frac{q_n - \bar{S}_m \sum_{i=1}^N \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{S}_m \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}} \right), \quad (18)$$

В свою очередь, используя, предполагая реализацию критерия Неймана-Пирсона, можем записать равенство для величины порога.

$$\Phi^{-1}(1 - P_{лт}) = \frac{q_n - \bar{S}_m \sum_{i=1}^N \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{S}_m \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}}, \quad (19)$$

$$q_n = \Phi^{-1}(1 - P_{\text{пт}}) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{S}_m \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)} + \bar{S}_m \sum_{i=1}^N \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right). \quad (20)$$

где $\Phi^{-1}[\Phi(x)] = x$ – обратная функция.

Подставим в, находим

$$P_{\text{обн}} = 1 - \Phi \left(\frac{\Phi^{-1}(1 - P_{\text{пт}}) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{S}_m \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)} - \sum_{i=1}^N \bar{S}_{ci} \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right)}} \right). \quad (21)$$

Выражение позволяет оценить эффективность оптического приемника, реализующего алгоритм обнаружения, изображенный схематично на рис. 3. В качестве показателя эффективности используется условная вероятность правильного обнаружения, представленная как зависимость от числа фотоотсчетов, обусловленных воздействием на вход приемника полезного и помехового (шумового) сигналов, а также от длительности интервала наблюдения (числа отсчетов) и от момента времени начала осуществления наблюдения в интервале времени формирования разведывательного передающим средствам предгенерационного спонтанного и спонтанно-индуцированного излучений [17].

Линеаризация зависимости интенсивности от времени спонтанной генерации

Перейдем к рассмотрению интенсивности спонтанного-индуцированного излучения, которое воздействует на вход оптического приемника, анализирующего его с момента времени t_n , накапливая сигнал до момента времени t_k (рис. 1), после чего с учетом шума формируется решение о наличии или отсутствии полезного сигнала. На практике длительность подынтервала τ_n весьма малая величина ($\sim 10^{-8}$ с) по сравнению с длительностью спонтанного излучения на выходе лазерного средства, работающего в режиме модуляции добротности резонатора ($\sim 10^{-4}$ с). Это позволяет приемлемо использовать метод линеаризации (рис. 4) на интервалах 10^{-6} с – 10^{-5} с с приемлемым качеством [18, 19].

Число подынтервалов с длительностью τ_n может составлять в этом случае $N = 10^2 - 10^3$. Что подтверждает возможность одновременного взвешенного накопления входного воздействия с использованием основных результатов и выводов центральной предельной теоремы для последовательностей независимых случайных величин [20, 21], а также линеаризации. Для реализации процедуры линеаризации воспользуемся выражением:

$$\bar{\gamma}_c(t) = kt + b, \quad (22)$$

где k и b – угловой коэффициент и начальная ордината, соответственно, определяемые из выражений

$$k = tg\alpha = \frac{\gamma_c(t_k) - \gamma_c(t_n)}{t_k - t_n}, \quad b = \gamma_c(t_k) - kt_k, \quad (23)$$

$$\bar{\gamma}_c(t) = \frac{\gamma_c(t_k) - \gamma_c(t_n)}{t_k - t_n} \cdot (t - t_n) + \gamma_c(t_n), \quad (24)$$

где $t_n \leq t \leq t_k$.

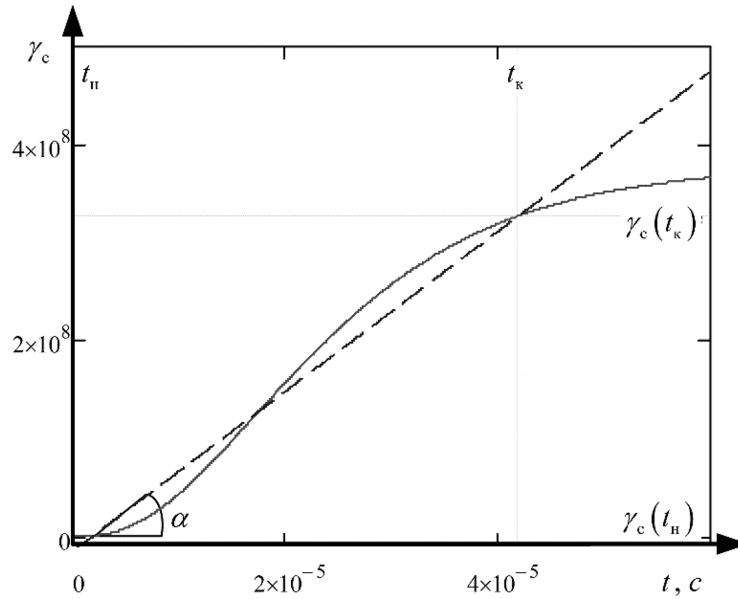


Рис. 4. Использование метода линеаризации

Fig. 4. Using the linearization method

Тогда среднее число сигнальных фотоэлектронов (образования переходов) может быть определено из выражения:

$$\bar{S}_{ci} = \frac{(\gamma_c(t_k) - \gamma_c(t_n)) \cdot \tau_n}{t_k - t_n} (i \cdot \tau_n) + \bar{\gamma}_c(t_n) \tau_n. \quad (25)$$

где $(t_n = i \cdot \tau_n) \leq t_k - t_n$.

В свою очередь, использование (25) позволяет осуществить замену операции суммирования на интегрирования [22–24], которая преобразует выражение к виду:

$$P_{обн} = 1 - \Phi \left\{ \frac{\Phi^{-1}(1 - P_{ит}) \sqrt{G_{ит}} - G_c}{\sqrt{G_{ит+c}}} \right\}, \quad (26)$$

на интервале $t_n \leq t \leq t_k$, при принятых обозначениях:

$$G_{ит} = \sum_{i=1}^N \bar{S}_{ит} \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_{ит}} \right) = \bar{\gamma}_{ит} \frac{\tau_n}{\bar{\gamma}_c(t)} \times \quad (27)$$

$$\times (q(t_k) \ln^2 q(t_k) - 2q(t_k) \ln q(t_k) + 2q(t_k) - q(t_n) \ln^2 q(t_n) + 2q(t_n) \ln q(t_n) - 2q(t_n)); \quad (28)$$

$$G_c = \sum_{i=1}^N \bar{S}_{ci} \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right) = \bar{\gamma}_m \tau_n \times$$

$$\times \frac{1}{2} \left(q^2(t_k) \ln q(t_k) - \frac{1}{2} q^2(t_n) \ln q(t_n) - \frac{q^2(t_k) - q^2(t_n)}{4} - \right. \quad (29)$$

$$\left. - q(t_k) \ln q(t_k) + q(t_n) \ln q(t_n) + (q(t_k) - q(t_n)) \right);$$

В свою очередь,

$$G_{m+c} = \sum_{i=1}^N (\bar{S}_{ci} + \bar{S}_m) \ln^2 \left(1 + \frac{\bar{S}_{ci}}{\bar{S}_m} \right) = \bar{\gamma}_m^2 \frac{\tau_n}{\bar{\gamma}_c(t)} \times$$

$$\times \left(q^2(t_k) \left[\ln^2 q(t_k) - \ln q(t_k) + \frac{1}{2} \right] - q^2(t_n) \left[\ln^2 q(t_n) - \ln q(t_n) + \frac{1}{2} \right] \right). \quad (30)$$

$$q(t_k) = 1 + \frac{\bar{\gamma}_c(t_k)}{\bar{\gamma}_m}; \quad q(t_n) = 1 + \frac{\bar{\gamma}_c(t_n)}{\bar{\gamma}_m}; \quad (31)$$

где $t_n \leq t \leq t_k$.

Оценка влияния линеаризации на вероятность обнаружения предгенерационного излучения

В целях оценки влияния линеаризации на обнаружения предгенерационного излучения с использованием выражений –, основанных на экспериментальных значениях интенсивности потока сигнальных фотоэлектронов, приведенных в табл. 1, произведено моделирование изменения зависимости вероятности правильного обнаружения от длительности интервала наблюдения (линеаризации) T , числа подынтервалов наблюдения $i = 1, 2, \dots, N$ и начального момента наблюдения t_n .

Таблица 1. Интенсивность потока сигнальных фотоэлектронов

Table 1 Intensity of the signal photoelectron flux

Интенсивность потока сигнальных фотоэлектронов $\gamma_c(t) \times 10^{-8}, 1/c$	Момент времени, относительно начала накачки, мкс												
	1	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$5 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,26	0,58	0,94	1,27	1,54	1,76	1,91	2,03	2,11	2,16	2,19	

На рис. 5 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения от числа подынтервалов наблюдения i для различных типовых значений условной вероятности ложных тревог. Графики получены при следующих исходных данных: интенсивность потока шумовых фотоэлектронов $\gamma_m(t) = 10^8$ 1/с, длительность подынтервала наблюдения $\tau_n = 5 \times 10^8$ с, момент начала наблюдения (с момента начала накачки) $t_n = 8 \times 10^{-6}$ с, интервал наблюдения изменялся в диапазоне $T_N = (5 \div 20) \times 10^{-6}$ с.

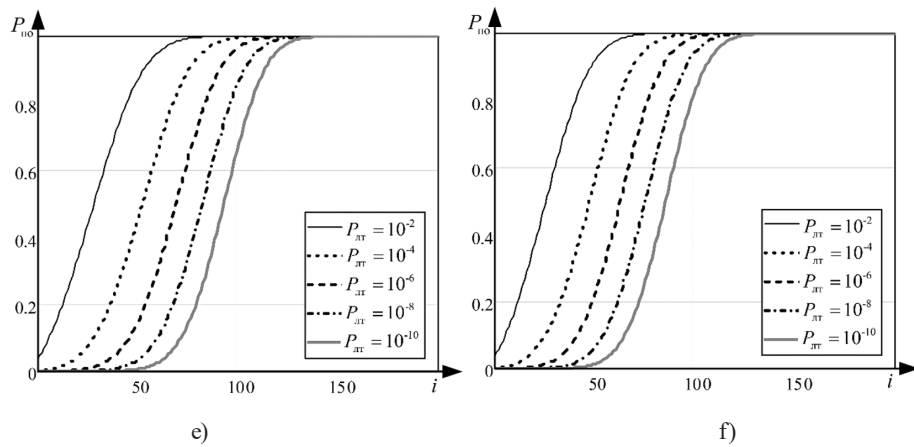
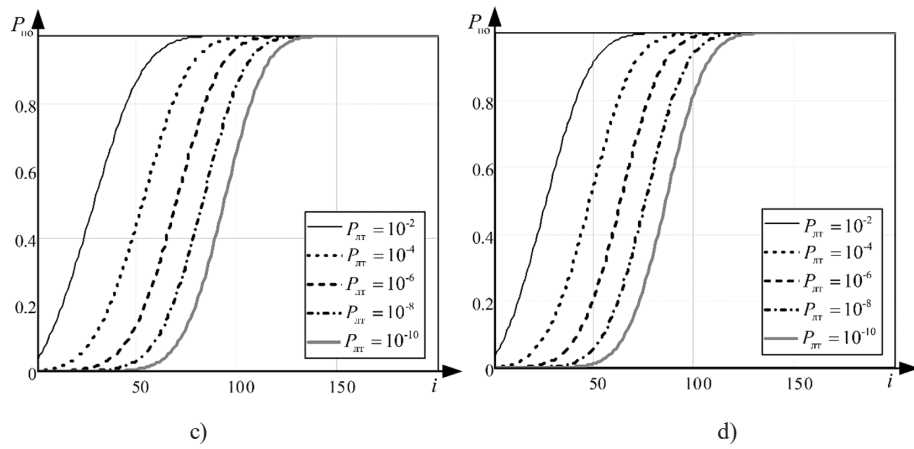
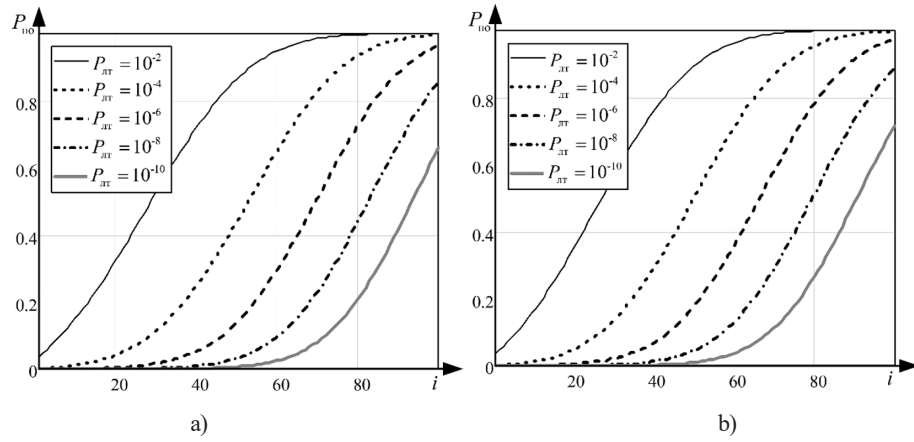


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного обнаружения от подынтервала наблюдения i для линейризованного (a, b, c) и исходного значений (d, e, f) интенсивности излучения

Fig. 5. Dependence of the probability of correct detection on the observation subinterval i for the linearized (a, b, c) and initial values (d, e, f) of the radiation intensity

Анализ графиков показывает наличие расхождения в вероятностях обнаружения для исходного и линеаризованного потока фотоэлектронов, изменяющегося с ростом периода наблюдения.

На рис. 6 приведены графические зависимости вероятностей правильного обнаружения для исходных и линеаризованных значений, а также абсолютное значение ошибки в оценке вероятности ΔP для случая, когда: $P_{\text{лт}} = 10^{-8}$, $\tau_{\text{н}} = 5 \cdot 10^{-8}$ с, а интервал наблюдения (интервал линеаризации) принимается равными: $T_{\text{N}} = 5 \times 10^{-6}$ с (рис. 6 а) и $T_{\text{N}} = 20 \times 10^{-6}$ с (рис. 6 б).

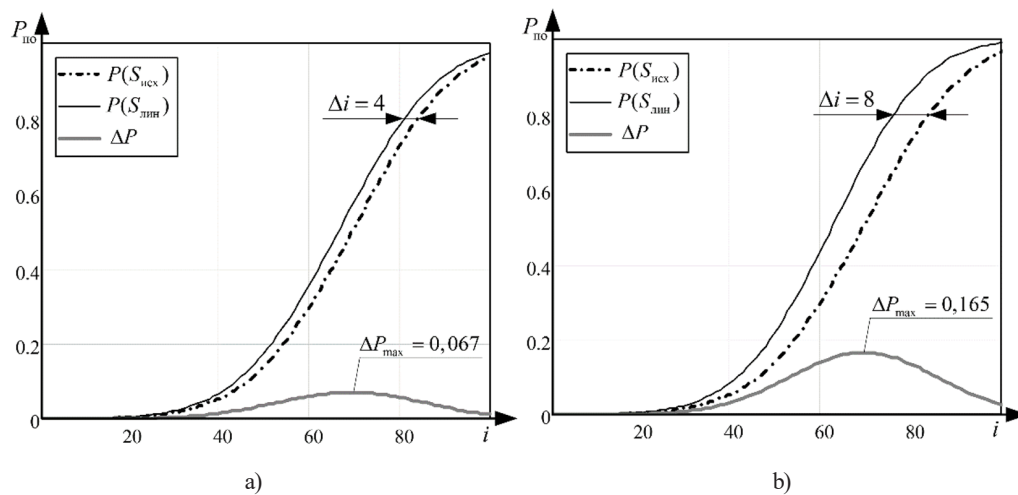


Рис. 6. Зависимость расхождения в вероятностях обнаружения от числа подынтервалов наблюдения i

Fig. 6. Dependence of the discrepancy in detection probabilities on the number of observation subintervals i

Из графиков, приведенных на рис. 6, видно расхождение в вероятностях обнаружения вследствие линеаризации, возрастающее с ростом интервала наблюдения. Причиной данного эффекта является начало наблюдения ($t_{\text{н}} = 8 \times 10^{-6}$ с) в момент нелинейного роста интенсивности спонтанного излучения, из чего следует необходимость исследования влияния выбора начального момента наблюдения на величину ошибки линеаризации.

Исследования показали возможность снижения расхождения в определении величин вероятности обнаружения до значений менее единиц процентов, при смещении начало наблюдения к более позднему моменту времени, в зону более линейного роста интенсивности излучения ($t_{\text{н}} = 20 \times 10^{-6}$ с). Однако данное решение привело к смещению располагаемого времени до момента генерации основного лазерного излучения в область значений порядка $(1 \div 2) \times 10^{-5}$ с. При этом устойчивое обнаружение будет осуществляться уже на $i = 17$ подынтервале наблюдения, следовательно, последующие такты наблюдения будут избыточными.

В результате исследования влияния момента начала наблюдения на потребное количество подынтервалов $i_{\text{обн}}$, обеспечивающих устойчивое обнаружение предгенерационного излучения, были получены графические зависимости, приведенные на рис. 7. В качестве потребного количества подынтервалов наблюдения принималось значение, удовлетворяющее условию:

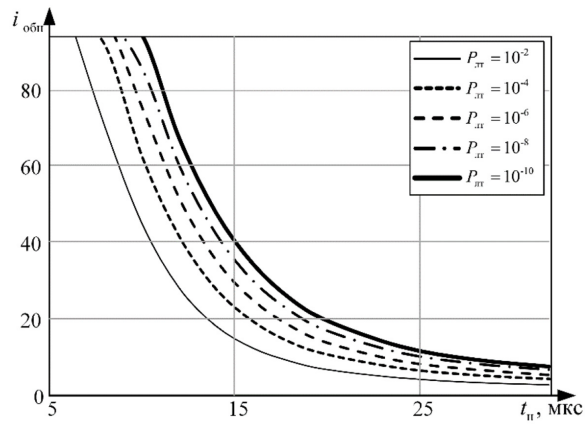


Рис. 7. Зависимость количество подынтервалов наблюдения, обеспечивающих устойчивое обнаружение
 Fig. 7. Dependence of the number of observation subintervals that ensure stable detection

$$i_{\text{обн}} = \arg \min P_{\Delta}(i_{\text{обн}}), \quad (32)$$

где $P_{\Delta}(i_{\text{обн}}) = |P_{\text{по}}(i_{\text{обн}}) - P_{\text{уст}}|$, $P_{\text{уст}} = 0,99$ – вероятности устойчивого обнаружения – принятое в качестве целевого значение вероятности правильного обнаружения.

Полагая интервал времени между началом накачки и моментом генерации основного излучения равным 6×10^{-5} с, с учетом ранее полученного потребного количества подынтервалов наблюдения, обеспечивающих достаточную вероятность правильного обнаружения, получены графические зависимости располагаемого времени от начального момента наблюдения, приведенные на рис. 8.

Результаты анализа графиков, приведенных на рис. 5–7, свидетельствуют о возможности практического применения допущения о линейности зависимости интенсивности от времени спонтанной генерации при определенных ограничениях, выражающихся в существенных расхождениях с исходными значениями в начальные моменты ($t_n < 10 \times 10^{-6}$ с) спонтанной гене-

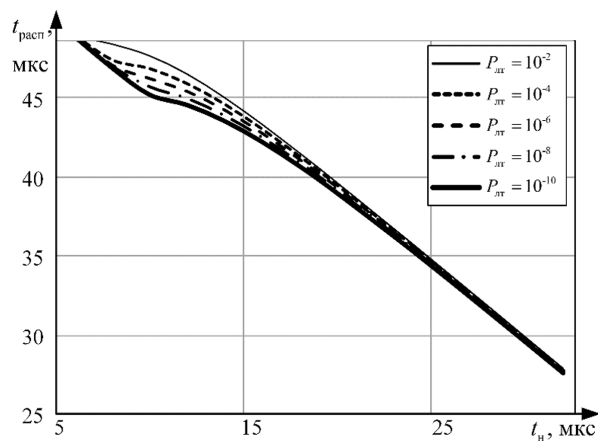


Рис. 8. Зависимость располагаемого времени от момента начала наблюдения

Fig .8. Dependence of available time on the moment of observation start

рации, отличающиеся большой нелинейностью, что может быть компенсировано задержкой начала наблюдения. Уменьшение располагаемого времени вследствие смещения начального момента наблюдения может быть частично нивелировано рациональным выбором числа подынтервалов наблюдения, обеспечивающего требуемую вероятность правильного обнаружения.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. При использовании в качестве демаскирующего признака функционирования и определения состояния передающих лазерных каналов предгенерационного спонтанного излучения возможно обнаружение передающего лазерного канала на дальностях, превышающих дальности работы самих обнаруживаемых лазерных средств. При этом устойчивое обнаружение ($P_{\text{обн}} = 0,99$) осуществляется с упреждением по отношению к зондирующему импульсу, формируемому этим передающим каналом на время $t_{\text{расп}}(3 \div 5) \times 10^{-5}$ с, что может считаться достаточным для реализации ряда мероприятий, в том числе и для реализации защитных мер.

2. Рациональный выбор начала и длительности наблюдения должен осуществляться исходя из конкретики предназначения информационного обеспечения с учетом необходимого значения длительности располагаемого времени и возникающих ограничений на длительность наблюдения (особенно в условиях конфликта).

3. Обоснование рационального алгоритма обнаружения оптическим приемником нестационарного спонтанного излучения осуществлялось в пуассоновских шумах, имеющих стационарный характер. Оценка эффективности алгоритма осуществлялась с учетом наличия процесса взвешенного суммирования принимаемого входного сигнала в исследуемом алгоритме, что дало возможность применить основные рекомендации, следующие из центральной предельной теоремы для последовательностей независимых случайных величин, что позволило провести оценки основных характеристик (среднего и дисперсии) суммированного взвешенного сигнала с выхода сумматора и привести функцию распределения к нормальной.

Список литературы / References

- [1] Козирацкий А.Ю., Кусакин А.В. Модель процесса формирования предгенерационного спонтанного излучения в передающих устройствах лазерных средств с модуляцией добротности резонатора. *Вестник военного института радиоэлектроники*, 2005, 3, 172–182 [Koziratsky A. Yu., Kusakin A. V. Model of the process of formation of pre-generation spontaneous emission in transmitting devices of laser means with resonator Q-modulation. *Vestnik voyennogo instituta radioelektroniki*, 2005, 3, 172–182 (in Rus.)].
- [2] Козирацкий А.Ю., Коровин В.М., Кусакин А.В., Подлужный В.И., Федукевич З.Б., Иванцов А.В. Компьютерное моделирование процесса формирования предгенерационных спонтанных излучений лазерными средствами с модуляцией добротности резонатора. *Вестник военного института радиоэлектроники*, 2006, 1(5), 42–48. [Koziratsky A. Yu., Korovina V.M., Kusakin A. V., Podluzhny V.I., Fedukovich Z. B., Ivantsov A. V. Computer modeling of the process of formation of pre-generation spontaneous emissions by laser means with Q-modulation of the resonator. *Vestnik voyennogo instituta radioelektroniki*, 2006, 1(5), 42–48. (in Rus.)]

- [3] Козирацкий Ю.Л., Козирацкий А. Ю., Прохоров Д. В., Федукovich З. Б. Модель процесса формирования ИК-излучения активного элемента на выходе лазерного средства. *Радиотехника*, 2008, 11, 35–39. [Koziratsky Yu.L., Koziratsky A. Yu., Prokhorov D. V., Fedukovich Z. B. Model of the process of formation of IR radiation of the active element at the output of a laser device. *Radiotekhnika*, 2008, 11, 35–39. (in Rus.)]
- [4] Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д. В., Грохотов Е. И., Дедов С. В. Излучение системы накачки лазерных каналов. *Радиотехника*, 2015, 12, 72–75. [Koziratsky Yu.L., Prokhorov D. V., Grokhotov E. I., Dedov S. V. Radiation of the pumping system of laser channels. *Radiotekhnika*, 2015, 12, 72–75. (in Rus.)]
- [5] Козирацкий Ю.Л., Афанасьева Е. М., Гревцев А. И., Донцов А. А., Иванцов А. В., Козирацкий А. Ю., Кулешов П. Е., Кусакин А. В., Паринов М. Л., Попело В. Д., Прохоров Д. В. *Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов: монография*. М.: Радиотехника, 2015, 456 с. [Koziratsky Yu.L., Afanaseva E. M., Grevtsev A. I., Dontsov A. A., Ivantsov A. V., Koziratsky A. Yu., Kuleshov P. E., Kusakin A. V., Parinov M. L., Parinov V. D., Prokhorov D. V. *Detection and coordinate measurement of optical-electronic means, assessment of their signal parameters: monograph*. Moscow: Radiotekhnika, 2015, 456 p. (in Rus.)]
- [6] Козирацкий Ю.Л., Алабовский А. В., Червяков В. С. Аналоговое моделирование лазера с пассивной модуляцией добротности при жестком возбуждении генерации. *Известие ВУЗов «Радиофизика»*, 1988, 10, 1264–1266. [Koziratsky Yu.L., Alabovsky A. V., Chervyakov V. S. Analog modeling of a laser with passive Q-switching under hard excitation of generation. *Izvestiye VUZov «Radiofizika»*, 1988, 10, 1264–1266. (in Russ.)]
- [7] Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д. В. Компьютерная модель передающего лазерного средства в предгенерационном режиме функционирования. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, 2019, 12, 233–242. [Koziratsky Yu.L., Prokhorov D. V. Computer model of a transmitting laser device in the pre-generation mode of operation. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*, 2019, 12, 233–242. (in Rus.)]
- [8] Козирацкий Ю.Л., Меркулов Р. Е., Кох Н. С. Обоснование принципов построения малогабаритной бортовой станции формирования упреждающих помех лазерным системам управления огнем зенитно-артиллерийского комплекса. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2018, 11(1), 6–15. [Koziratsky Yu.L., Merkulov R. E., Kokh N. S. Justification of the principles of constructing a small-sized onboard station for generating preemptive interference for laser fire control systems of an anti-aircraft artillery complex. *J. Sib. Fed. Univ. Engineering technology*, 2018, 11(1), 6–15. (in Rus.)]
- [9] Калинин В. С., Козирацкий А. А. Методика обоснования пространственных характеристик лазерного луча систем телекоммуникации при вхождении в связь с воздушными объектами управления. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(3), 338–349. [Kalinin V. S., Koziratsky A. A. Methodology for substantiating the spatial characteristics of a laser beam of telecommunication systems when communicating with airborne control objects. *J. Sib. Fed. Univ. Engineering technology*, 2020, 13(3), 338–349. (in Rus.)]
- [10] Козирацкий Ю.Л., Хильченко Р. Г., Меркулов Р. Е., Козирацкий А. А. Алгоритм оценки положения лазерного луча матричным фотоприемником на фоне гауссовского шума с использованием полной достаточной статистики принимаемого рассеянного излучения. *Журнал Сибир-*

ского федерального университета. *Техника и технологии*, 2021, 14(3), 265–271. [Koziratsky Yu.L., Khilchenko R. G., Merkulov R. E., Koziratsky A. A. Algorithm for estimating the position of a laser beam by a matrix photodetector against a background of Gaussian noise using complete sufficient statistics of the received scattered radiation. *J. Sib. Fed. Univ. Engineering technology*, 2021, 14(3), 265–271. (in Rus.)]

[11] Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д.В. Методический подход к построению компьютерных моделей процессов образования внеполосных и побочных излучений в передающих лазерных средствах на основе использования передаточных функций и Z-преобразования. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, 2019, 12, 243–251. [Koziratsky Yu.L., Prokhorov D. V. Methodological approach to the construction of computer models of the processes of formation of out-of-band and spurious emissions in transmitting laser means based on the use of transfer functions and Z-transform. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*, 2019, 12, 243–251. (in Rus.)]

[12] Парфенов В. И., Кириллов В. С. Обнаружение оптических сигналов при приеме потока фотоэлектронов с неизвестной формой плотности. *Компьютерная оптика*, 2012, 36(4), 618–622. [Parfenov V. I., Kirillov V. S. Detection of optical signals when receiving a flow of photoelectrons with an unknown density shape. *Komp'yuternaya optika*, 2012, 36(4), 618–622. (in Rus.)]

[13] Козирацкий А. А., Хильченко Р. Г., Шутько Е. М. Адаптивная регулировка спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2022, 15(1), 45–57. [Koziratsky A. A., Khilchenko R. G., Shutko E. M. Adaptive regulation of the spectral component of the radiation power of a multi-wave laser system. *J. Sib. Fed. Univ. Engineering technology*, 2022, 15(1), 45–57. (in Rus.)]

[14] Шереметьев А. Г. *Статистическая теория лазерной связи*. М.: Связь, 1971. 264 с. [Sheremetyev A. G. *Statistical theory of laser communication*. Moscow: Svyaz, 1971. 264 p. (in Russian)]

[15] Гальярди Р. М. *Оптическая связь: Перевод с английского*. М.: Связь, 1978. 424 с. [Gagliardi R. M. *Optical communications: Translation from English*. Moscow: Svyaz, 1978. 424 p. (in Rus.)]

[16] Козирацкий Ю.Л., Смирнов А. В., Потехецкий С. В. Определение числа посылок лазерной локационной системы. *Радиотехника*, 1986, 2, 51–56. [Koziratsky Yu.L., Smirnov A. V., Potekhetsky S. V. Determination of the number of laser location system messages. *Radiotekhnika*, 1986, 2, 51–56. (in Rus.)]

[17] Козирацкий Ю.Л., Хильченко Р. Г., Плева В. В., Шутько Е. М. Оптико-электронная подсистема высокоточного информационного обеспечения средств защиты летательного аппарата со стороны задней полусферы. *Радиотехника*, 2021, 85(1), 75–79. [Koziratsky Yu.L., Khilchenko R. G., Pleva V. V., Shutko E. M. Optical-electronic subsystem of high-precision information support for aircraft protection systems from the rear hemisphere. *Radiotekhnika*, 2021, 85(1), 75–79. (in Rus.)]

[18] Калинин В. С., Козирацкий А. А., Шмаров А. Н. Методика обоснования характеристик пассивно-лазерного канала передачи информации от беспилотного летательного аппарата к наземному пункту управления. *Радиотехника*, 2021, 85(1), 37–42. [Kalinini V. S., Koziratsky A. A., Shmarov A. N. Methodology for substantiating the characteristics of a passive laser

channel for transmitting information from an unmanned aerial vehicle to a ground control point. *Radiotekhnika*, 2021, 85(1), 37–42. (in Rus.)]

[19] Донцов А. А., Калачев В. В., Козирацкий Ю. Л., Левшин Е. А. Модель процесса разведки многоспектрального предгенерационного излучения перспективных лазерных средств локации и целеуказания. *Радиотехника*, 2021, 85(1), 53–60. [Dontsov A. A., Kalachev V. V., Koziratsky Yu. L., Levshin E. A. Model of the reconnaissance process of multispectral pre-generation radiation of promising laser location and target designation systems. *Radiotekhnika*, 2021, 85(1), 53–60. (in Rus.)]

[20] Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. *Основы импульсной лазерной локации: учебное пособие для вузов*. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 512 с. [Kozintsev V. I., Belov M. L., Orlov V. M. *Fundamentals of pulse laser location: a textbook for universities*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow, State Technical University, 2006. 512 p. (in Rus.)]

[21] Соболев В. С., Полещук Ю. А. Максимально правдоподобные оценки параметров оптических сигналов с учетом дробового и фоновых шумов. *Компьютерная оптика*, 2006, 30, 98–106. [Sobolev V. S., Poleshchuk Yu. A. Maximum likelihood estimates of optical signal parameters taking into account shot and background noise. *Komp'yuternaya optika*, 2006, 30, 98–106. (in Rus.)].

[22] Козирацкий Ю. Л., Алабовский А. В. Особенности различения оптических сигналов, подчиняющихся пуассоновской статистике. *Радиотехника*, 1989, 1, 35–39. [Koziratsky Yu. L., Alabovsky A. V. Features of distinguishing optical signals obeying Poisson statistics. *Radiotekhnika*, 1989, 1, 35–39. (in Rus.)]

[23] Козирацкий Ю. Л., Козирацкий А. Ю., Иванцов А. В. Оценочно-компенсационный алгоритм различения кратковременно существующих изображений приемником, работающим в режиме счета фотоэлектронов. *Радиотехника*, 2004, 5, 100–105. [Koziratsky Yu. L., Koziratsky A. Yu., Ivantsov A. V. Evaluation-compensation algorithm for distinguishing short-term existing images by a receiver operating in photoelectron counting mode. *Radiotekhnika*, 2004, 5, 100–105. (in Rus.)]

[24] Климов Ю. М. *Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами*. М.: Советское радио, 1978. 265 с. [Klimov Yu. M. *Fundamentals of calculation of optical-electronic devices with lasers*. Moscow, Sovetskoe radio, 1978. 265 p. (in Rus.)]

EDN: WGQNHB

УДК 621.928.6

The Method of Calculating the Technological Parameters of Separation Equipment for the Production of Fractional Quartz Sands

Vladimir B. Ponomarev*

*Ural Federal University
Yekaterinburg, Russian Federation*

Received 20.02.2025, received in revised form 04.05.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. The article considers the application of dry fractionation technology of quarry quartz sands. A technological scheme for the joint use of air classification and subsequent screening of dust-free fractions is proposed. A mathematical model has been developed that makes it possible to predict the obtained granulometric compositions of sands based on the separation characteristics of the equipment. Based on the results of laboratory tests of the sands of the Chelyabinsk, Nevyansky, Basyanovsky and Bogdanovichsky quarries, mathematical approximations were obtained to calculate the air flow velocities through the air separator and calculate the separation curve of separation.

Keywords: air classifier, separation efficiency, air flow velocity, quartz sand.

Citation: Ponomarev V.B. The Method of Calculating the Technological Parameters of Separation Equipment for the Production of Fractional Quartz Sands. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 529–537. EDN: WGQNHB



Методика расчета технологических параметров сепарационного оборудования для получения фракционных кварцевых песков

В. Б. Пономарев

*Уральский федеральный университет
Российская Федерация, Екатеринбург*

Аннотация. Рассмотрено применение сухой технологии фракционирования карьерных кварцевых песков. Предложена технологическая схема совместного использования воздушной классификации и последующего грохочения обеспыленных фракций. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать получаемые гранулометрические составы песков на основе сепарационных характеристик оборудования. По результатам лабораторных испытаний песков Челябинского, Невьянского, Басьяновского и Богдановичского карьеров получены математические аппроксимации для вычисления скоростей воздушного потока через воздушный сепаратор и расчета сепарационной кривой разделения.

Ключевые слова: воздушный классификатор, эффективность разделения, скорость воздушного потока, кварцевый песок.

Цитирование: Пономарев В. Б. Методика расчета технологических параметров сепарационного оборудования для получения фракционных кварцевых песков / В. Б. Пономарев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 529–537. EDN: WGQNHБ

Введение

Особенность производства сухих смесей состоит в использовании сухих заполнителей, в большей части кварцевых песков. В данной работе рассматривается применение технологии фракционирования высушенного карьерного сырья на примере Челябинского, Невьянского, Басьяновского и Богдановичского карьерных песков. Гранулометрический состав песков приведен в табл. 1.

Задача состоит в переработке данных песков во фракционные.

Наиболее распространенными являются следующие фракции песка: 2,5–5,0 мм, 0,63–2,5 мм; 0,315–0,63 мм; 0–0,315 мм [1–3]. При этом требование на загрязнение верхнего размера крупными фракциями ограничивается величиной до 1 %, содержание частиц мельче нижнего предела до 10 %. Количество пылевидных частиц с размером менее 0,16 мм рекомендуется до 1,5 % [4, 5].

Таблица 1. Гранулометрический состав карьерных песков

Table 1. Granulometric composition of quarry sands

Фракция, мм		+5,0	-5,0 +2,5	-2,5 +1,25	-1,25 +0,63	-0,63 +0,315	-0,315 +0,16	–0,16
Частные остатки, %	Челябинский карьер	3,5	9,4	12,6	24,5	20,0	21,6	8,4
	Невьянский карьер	5	20,1	21,3	17,7	17,9	8,6	9,4
	Басьяновский карьер	0,3	0,5	0,6	2,3	35,2	47,5	13,6
	Богдановичский карьер	1,8	1,6	5,2	28,7	38,5	17,9	6,3

Методы и принципы исследования

Наиболее распространенным оборудованием для сухого фракционирования песков является рассев их на вибрационных грохотах [6–8]. Однако общеизвестно, что грохочение эффективно до определенного предела крупности перерабатываемого на них материала. Условно принимается, что минимальный размер зерен не должен быть менее 1 мм. В настоящее время имеются конструкции грохотов, работающих и на меньших границах разделения, например [9]. Однако с уменьшением крупности значительно увеличивается необходимая площадь поверхности сит и снижается эффективность сепарации.

Более рациональным решением задачи будет совместное использование воздушной сепарации в каскадных классификаторах [10, 11] по тонким границам и последующее грохочение обеспыленного продукта на сетках.

Основная часть

В качестве способа получения фракционных кварцевых песков предлагается следующая технологическая схема (рис. 1).

Сухой кварцевый песок после сушильного барабана 1, имеющего систему пылеочистки 2, поступает по транспортеру 5 в наклонный пневматический обеспыливатель 6, где разделяется по границе 140–160 мкм. Конструкция обеспыливателя включает в себя встроенную осадительную камеру 9, поэтому в установку пылеочистки 3 в основном попадают фракции не крупнее 50–70 мкм. Обеспыленный песок элеватором 7 подается на трехдечный грохот 8 с сетками 5,0; 2,5 и 0,7 мм. Подрешетный материал поступает на наклонный пневматический классификатор, где разделяется по требуемой границе 0,2–0,3 мм. Остаточная пыль, возникающая при транспортировках и рассевах, улавливается в пылеочистном устройстве 4. В результате на выходе получаем фракционированный песок 5–10 мм, 2,5–5 мм, 0,7–2,5 мм, 0,3–0,7 мм, 0,05–0,3 мм и 0,05–0,16 мм.

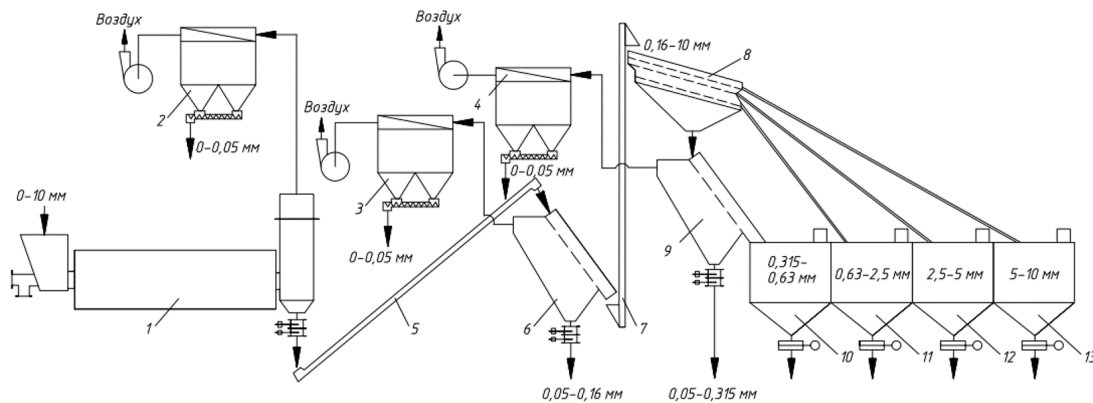


Рис. 1. Технологическая схема фракционирования песков: 1 – сушильный барабан; 2, 3, 4 – установки пылеочистки; 3 – транспортер; 4 – пневматический обеспыливатель; 5 – элеватор; 6 – трехдечный вибрационный грохот; 7 – пневматический классификатор, 8, 9, 10, 11 – бункеры фракционированных материалов

Fig. 1. Technological scheme of sand fractionation: 1 – drier drum; 2, 3, 4 – dust cleaning units; 3 – conveyor; 4 – pneumatic deduster; 5 – bucket elevator; 6 – triple deck screen; 7 – air classifier, 8, 9, 10, 11 – fractionated materials bunkers

Расчет технологических параметров сводится к определению сепарационных характеристик процессов грохочения и пневматической классификации, позволяющих прогнозировать гранулометрические составы получаемых фракционных песков. Для построения математической модели прогноза также необходимо знать зависимость скорости воздушного потока в пневматических классификаторах от границы разделения.

Известны методы получения сепарационных характеристик грохотов, однако широко применяемое для расчетов фракционного состава уравнение Годена [12] отличается от реальной сепарационной характеристики грохочения из-за попадания крупных продолговатых частиц в подрешетный продукт и не доизвлечения подграницных фракций в надрешетном материале, а также адгезией пылевых частиц на крупных зернах [13].

В работе [14] приведена реальная сепарационная характеристика грохочения угля. Если аппроксимировать ее двухпараметрической функцией Плитта [15], получим показатель остроты $p = 9,5$. Можно предположить, что сепарационная характеристика будет отличаться для надситового и подситового продуктов. Так как подрешетный материал всегда более «чистый» с небольшим количеством крупных фракций, предлагается для него применять показатель остроты функции Плитта $p = 15$, соответственно, для надрешетного продукта $p = 10$.

Данные рекомендации не носят обязательный характер, но позволяют достаточно реально рассчитать гранулометрические составы продуктов грохочения. Таким образом, уравнение фракционного разделения на сетке грохота примет вид

$$\Phi_m(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_s}\right)^{10}} & \text{при } x_i \leq x_s \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_s}\right)^{15}} & \text{при } x_i > x_s, \end{cases} \quad (1)$$

где x_s – размер ячеек сетки грохота; x_i – размер узкой фракции частиц; $\Phi_m(x_i)$ – извлечение узких фракций частиц в подрешетный продукт.

Для надрешетного продукта будет верно следующее равенство

$$\Phi_k(x_i) = 1 - \Phi_m(x_i), \quad (2)$$

где $\Phi_k(x_i)$ – извлечение узких фракций частиц в надрешетный продукт.

Зная исходный гранулометрический состав песка, можно рассчитать составы получаемых продуктов.

Для получения сепарационной характеристики пневматических классификаторов были проведены лабораторные эксперименты на песках Богдановичского карьера, в которых варьировалась скорость w воздушного потока через жалюзи сепарационной решетки и производительность Q питания. Для каждого эксперимента определялась сепарационная характеристика, которая аппроксимировалась функцией Плитта, и вычислялись граница разделения x_{50} и показатель остроты p . Зная площадь сепарационной решетки и скорость воздушного потока, можно вычислить расходную концентрацию материала в классификаторе как отношение производительности по питанию к объемному расходу воздуха через аппарат. После обработки экспериментальных и расчетных данных получены следующие зависимости:

$$w = \sqrt{gx_{50}(8,12 - 2\ln\mu)}, \quad (3)$$

$$p = 5,9\mu^{-0.167}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; μ – расходная концентрация, кг/м^3 .

Для проверки адекватности модели были проведены контрольные эксперименты на песках Челябинского и Невьянского карьеров. На рис. 2, 3 представлены результаты экспериментов и их аппроксимации данными уравнениями. Треугольными значками показаны данные контрольных экспериментов, сплошными линиями – расчетные зависимости.

Таким образом, функцию фракционного разделения пневматического классификатора можно записать как

$$\Phi_m(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^{(5,9\mu^{-0.167})}}. \quad (5)$$

Уравнения (1)-(3) и (5) представляют математическую модель процесса фракционирования песков, на основании которой в EXEL была составлена таблица расчета гранулометрических составов фракционированных песков:

Для проверки полученной модели проведены контрольные эксперименты песков Челябинского, Басьяновского и Невьянского месторождений. Для примера в табл. 3 приведены данные контрольного эксперимента и расчетные значения для песка Невьянского карьера.

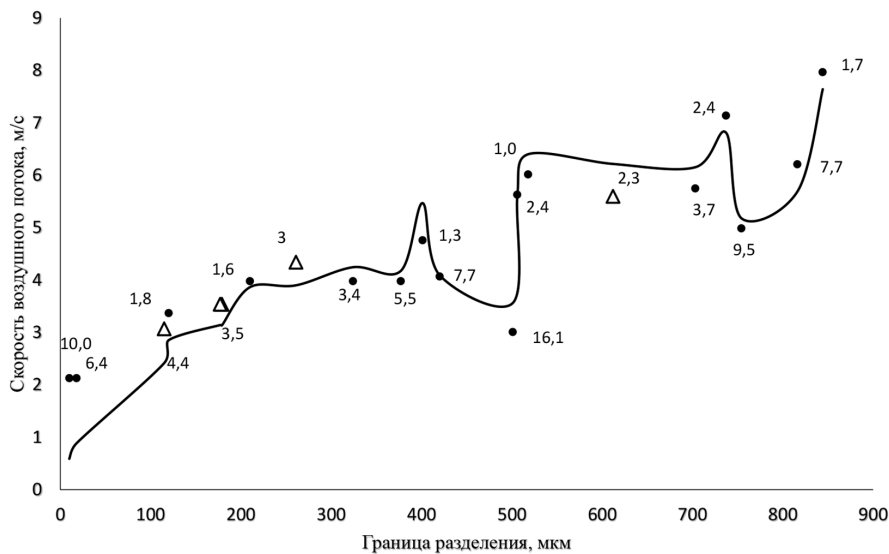


Рис. 2. Зависимость скорости воздушного потока через жалюзи пневматического классификатора от границы разделения и расходной концентрации (цифрами обозначены значения расходной концентрации в экспериментах).

Fig. 2. The dependence of the air flow velocity through the blinds of the air classifier on the separation boundary and the flow concentration (the figures indicate the values of the flow concentration in the experiments)

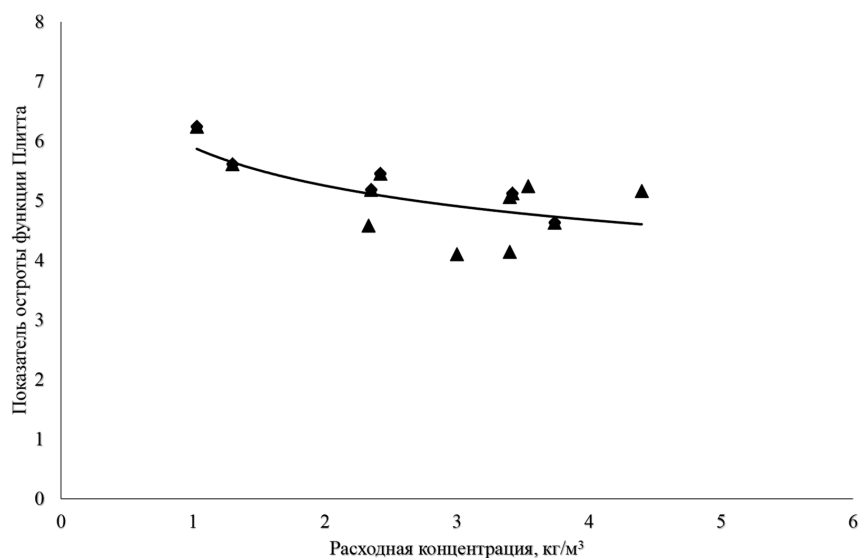


Рис. 3. Зависимость показателя остроты функции Плитта от расходной концентрации материала в классификаторе

Fig. 3. The dependence of the indicator of the acuity of the Plate function on the consumable concentration of the material in the air classifier

Таблица 2. Гранулометрический состав фракционных песков

Table 2. Granulometric composition of fractional sands

Челябинский карьер						
Сито, мм	Фракции, мм					
10,0	-0,16	5,00	-5,0+2,5	-2,5+0,63	-0,63+0,16	0,16
5,0		96,5	0,6			
2,5		3,5	97,6	0,4		
1,25			1,8	34,6		
0,63				64,8	3,2	
0,315	0,7			0,2	51,9	4,9
0,16	17,5				36,6	87,1
0	81,7				0,0	8,0
Невьянский карьер						
Сито, мм	Фракции, мм					
10,0	-0,16	5,00	-5,0+2,5	-2,5+0,63	-0,63+0,16	0,16
5,0		94,9	0,4			
2,5		5,1	98,2	0,9		
1,25			1,4	55,0		
0,63				44,0	3,7	
0,315	0,6			0,1	73,3	9,2
0,16	7,0				23,0	72,2
0	92,3				0,0	18,5

Продолжение табл. 1

Table 1 Continued

Басьяновский карьер						
Сито, мм	Фракции, мм					
10,0	-0,16	5,00	-5,0+2,5	-2,5+0,63	-0,63+0,16	0,16
5,0		97,8	1,0			
2,5		2,2	97,4	0,3		
1,25			1,6	20,5		
0,63				75,8	0,2	
0,315	0,7			3,3	53,1	4,1
0,16	22,4				46,7	89,9
0	76,9				0,0	6,0
Богдановичский карьер						
Сито, мм	Фракции, мм					
10,0	-0,16	5,00	-5,0+2,5	-2,5+0,63	-0,63+0,16	0,16
5,0		98,8	1,9			
2,5		1,2	94,0	0,1		
1,25			4,2	15,8		
0,63				83,8	2,8	
0,315	1,7			0,3	74,5	10,8
0,16	18,8				22,6	82,3
0	79,4				0,0	6,8

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные данные для Невьянского карьера*

Table 3. Experimental and calculated data for the Nevyansk quarry

Сита, мкм	Фракция, мкм	r_k , %	r_{oc} , %	$r_{ц}$, %	$r_{исх}$, %	r_m , %	Φ	Расчет r_k , %	Расчет r_m , %
2500	3600	1,00	-	-	0,92	-	-	-	-
1600	2050	19,88	-	-	18,24	-	-	20,13	0,00
1000	1300	25,30	-	-	23,21	-	-	25,61	0,02
800	900	10,24	-	-	9,40	-	-	10,36	0,04
630	715	9,84	-	-	9,03	-	-	9,95	0,13
400	515	18,57	-	-	17,04	-	-	18,70	1,17
315	358	1,00	-	-	0,92	-	-	0,98	0,35
160	238	13,76	41,30	16,58	15,57	35,74	0,19	13,85	35,73
50	105	0,40	55,60	61,68	5,07	56,97	0,93	0,42	55,43
-	25	-	3,10	21,74	0,60	7,30	1,00	0,00	7,12
Выход, %		91,75	6,39	1,86		8,25		91,55	8,45

* r_k – частные остатки рассева крупного продукта; r_{oc} – частные остатки рассева продукта из осадительной камеры; $r_{ц}$ – частные остатки рассева пыли из бункера циклона; $r_{исх}$ – частные остатки рассева исходного продукта; r_m – частные остатки смеси продуктов из осадительной камеры и циклона; Φ – функция извлечения узких фракций частиц в мелкий (смешанный) продукт.

Выводы

Обоснована возможность применения каскадных воздушных классификаторов для сухого получения различных фракций кварцевого песка.

Разработана математическая модель процесса сепарации кварцевых песков. Стандартное отклонение расчетного и экспериментально измеренного гранулометрического состава по крупному продукту от 0,01 до 2,4 %, по мелкому 0,8–10,3 % для песков из различных месторождений.

Компьютерный эксперимент показал возможность получения фракций песка: 0–3 мм; 0–0,63 мм; 0,63–3 мм; 0,63–1,25 мм; 1,25–3,0 мм; 0,315–0,63 мм и 0–0,315 мм с минимальными потерями в хвостах.

Список литературы / References

- [1] Баженов Ю. М., Коровяков В. Ф., Денисов Г. А. *Технология сухих строительных смесей*. Москва: Издательство АСВ, 2015. 112 [Bazhenov Yu.M., Korovyakov V.F., Denisov G. A. *Technology of dry building mixes*. Moskva: ASV, 2015. 112 p. (in Rus.)]
- [2] Грызлов В. С., Фоменко А. И., Каптюшина А. Г., Чорная Т. Н. Сухие строительные смеси на основе местных сырьевых ресурсов. *Сухие строительные смеси*. 2020. 2. 20–23 [Gryzlov V. S., Fomenko A. I., Kaptyushina A. G., Chornaya T. N. Dry building mixes based on local raw materials. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2020. 2. 20–23 (in Rus.)]
- [3] Дергунов С. А., Рубцова В. Н. Разработка составов фракционированных песков. *Строительные материалы*. 2005. 4. 30–31 [Dergunov S. A., Rubcova V. N. Development of fractionated sand compositions. *Stroitel'nye materialy*. 2005. 4. 30–31 (in Rus.)]
- [4] Белов В. В., Образцов И. В. Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов. *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2018. 2(51). 42–54 [Belov V. V., Obrazcov I. V. Optimal structures of raw materials mixtures in the manufacture of building cement composites. *ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi*. 2018. 2(51). 42–54. (in Rus.)]
- [5] Чередниченко Т. Ф., Тухарели В. Д., Абухба Б. А. Оптимизация зернового состава кварцевого песка – как фактор ресурсосбережения в строительстве. *Инженерный вестник Дона*. 2016. 4. 132–140. [Cherednichenko T. F., Tuhareli V. D., Abuhba B. A. Optimization of the grain composition of quartz sand as a resource-saving factor in construction. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2016. 4. 132–140. (in Rus.)]
- [6] Морев М. И., Сарвас А. С., Дергунов С. А. Современные технологии обогащения зернистых материалов. *Тенденции развития науки и образования*. 2016. 13–3. 12–16. DOI 10.18411/lj2016–4–44 [Morev M. I., Sarvas A. S., Dergunov S. A. Modern technologies for the enrichment of granular materials. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2016. 13–3. 12–16. DOI 10.18411/lj2016–4–44 (in Rus.)].
- [7] Чирков А. С. *Добыча и переработка строительных горных пород*. Москва: Издательство Московского государственного горного университета. 2001. 623 с. [Chirkov A. S. *Mining and processing of building rocks*. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 2001. 623 p. (in Russ.)].
- [8] Балаева К. Ж. Добыча и фракционирование гравия. *EurasiaScience: Сборник статей ЛП международной научно-практической конференции*, Москва, 31 марта 2023 года. Москва:

ООО «Актуальность. РФ», 2023. 43–45. [Balaeva K. Zh. Extraction and fractionation of gravel. *EurasiaScience: Sbornik statej LII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Moskva, 31 marta 2023 goda. Moskva: OOO «Aktual'nost'. RF», 2023. 43–45 (in Rus.)].*

[9] Дубов В. А. Повышение эффективности переработки горных пород. *Строительные материалы*. 2004. 1. 22–24. [Dubov V. A. Improving the efficiency of rock processing. *Stroitel'nye materialy*. 2004. 1. 22–24. (in Rus.)]

[10] Пономарев В. Б. Получение узких фракций кварцевых песков для сухих строительных смесей воздушной сепарацией. *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2021. 1(62). 46–52. [Ponomarev V. B. Production of narrow fractions of quartz sand for dry building mixes by air separation. *ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi*. 2021. 1(62). 46–52. (in Rus.)]

[11] Ponomarev V. B. Pneumatic fractionation of enriched quartz sand for dry building mixtures. *AIP Conference Proceedings: 16, Nizhny Tagil, 17–19 июня 2021 года. – Nizhny Tagil, 2022. P. 030030. DOI 10.1063/5.0074714.*

[12] Gaudin A. M. Principles of mineral dressing. *New York: McGraw-Hill Book Company*, 1932. 432 p.

[13] Пелевин А. Е. Сепарационная характеристика грохота. *Обогащение руд*. 2011. 2. 45–48. [Pelevin A. E. Separation characteristics of the screen. *Obogashchenie rud*. 2011. 2. 45–48. (in Rus.)]

[14] Полулях А. Д., Полулях Д. А. *Грохочение угля*, 2020. Код доступа <https://onlinereads.net/bk/57453885-grohochenie-uglya?ysclid=lu10ya7xcx511674047> [Polulyah A. D., Polulyah D. A. *Coal rumbling*. 2020. Access code <https://onlinereads.net/bk/57453885-grohochenie-uglya?ysclid=lu10ya7xcx511674047> (in Rus.)]

[15] Ponomarev V. B. & Shishkin A. S. Methodology of designing an air cascade separator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 966(1), [012043]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012043>

EDN: CXDYXH

УДК 519.6

Calculation and Optimization of the Housing of the Electric Drive of the Gas Gate Valve

Evgeniy A. Golovenko^{a, b} and Evgeny A. Pavlov^{a*}

^a*Dioton LLC*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*Siberian Federal University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 18.05.2025, received in revised form 22.05.2025, accepted 26.05.2025

Abstract. The article considers the optimization of the design and technology of the explosion-proof housing of the electric drive of the gas valve based on the calculation of the stress-strain state by the finite element method. The 3D numerical model takes into account the bolted connection of the flange and the contact interaction, which allows you to correctly consider the opening of the joint and the deformation of the housing as a whole. An assessment is made of the possibility of using aluminum alloys, deformable and casting groups, as a result of which a design of welded parts is developed, which allows you to significantly reduce the material intensity of the production of parts and improve their manufacturability for serial production.

Keywords: finite element modeling, import substitution, optimization of the explosion-proof housing design, contact problem, electric drive of the gas gate valve.

Acknowledgements. This work was carried out in accordance with the agreement on the procedure for targeted financing No. 743 dated December 29, 2023 “Development of a serial sample, production technology and commissioning of an explosion-proof electric drive EV-Drive in cooperation with educational institutions and industrial enterprises of the Krasnoyarsk Territory”, funded by the regional state autonomous institution “Krasnoyarsk Regional Fund for Support of Scientific and scientific and technical activities”.

Citation: Golovenko E. A., Pavlov E. A. Calculation and Optimization of the Housing of the Electric Drive of the Gas Gate Valve. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 538–555. EDN: CXDYXH



Расчет и оптимизация корпуса электропривода газовой задвижки

Е. А. Головенко^{а, б}, Е. А. Павлов^а

^аООО «Диотон»

Российская Федерация, Красноярск

^бСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В статье рассматривается оптимизация конструкции и технологии взрывонепроницаемого корпуса электропривода газовой задвижки на основе расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. 3-мерная численная модель учитывает болтовое соединение фланца и контактное взаимодействие, что позволяет корректно рассмотреть раскрытие стыка и деформацию корпуса в целом. Сделана оценка возможности использования алюминиевых сплавов, деформируемой и литейной групп, в результате чего разработана конструкция из свариваемых деталей, которая позволяет существенно сократить материалоемкость производства деталей и улучшить их технологичность для серийного производства.

Ключевые слова: моделирование методом конечных элементов, импортозамещение, оптимизация конструкции взрывонепроницаемого корпуса, контактная задача, электропривод газовой задвижки.

Благодарности. Настоящая работа выполнена в соответствии с договором о порядке целевого финансирования № 743 от «29» декабря 2023 г. «Разработка серийного образца, технологии производства и постановки на производство Электропривода взрывозащищенного EV-Drive в кооперации с образовательными учреждениями и промышленными предприятиями Красноярского края», финансируемого краевым государственным автономным учреждением «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

Цитирование: Головенко Е. А. Расчет и оптимизация корпуса электропривода газовой задвижки / Е. А. Головенко, Е. А. Павлов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 538–555. EDN: CXDYXH

Введение

Нефтехимическая и нефтегазодобывающая отрасли предъявляют повышенные требования к надежности и функциональности оборудования по сравнению с устройствами общепромышленного применения, ввиду того что оборудование подвергается воздействиям низких температур в полярном поясе, воздействию влажного и соленого воздуха в прибрежных районах и не должно требовать частого периодического обслуживания и ремонта из-за удаленности места установки от жилых индустриальных зон и транспортной инфраструктуры. Кроме того, устанавливаемое оборудование должно иметь локализованное производство в России и доступные запасные части. К такому классу устройств относятся электроприводы газовых задвижек с высоким уровнем автоматизации и удаленным управлением разработки компании ООО «Мехатроника Про» – российского лидера в области разработки силовой электроники и ПО, которая представила свои рабочие прототипы, предназначенные для работы на газораспределительных станциях. ООО «Диотон» совместно с Сибирским федеральным университетом в лице «Центра инженерных разработок» было разработано серийное изделие (его механическая часть) на основе прототипа и технология его автоматизированного производства, при

этом необходимо было оптимизировать конструкцию взрывонепроницаемых оболочек (корпусов) этих электроприводов и внести необходимые изменения в конструкцию.

Электроприводы взрывонепроницаемого исполнения EV-Drive могут применяться для управления трубопроводной запорной арматурой в химической, нефтяной, газовой, энергетической отраслях промышленности. Взрывозащищенные электроприводы могут устанавливаться во взрывоопасных зонах класса ИВ по ГОСТ Р 51330.0–99 в помещениях, на открытом воздухе под навесом в соответствии с ПУЭ гл. 7.3 для оборудования с маркировкой взрывозащиты 1ExdIIBT4. Тип присоединения к арматуре – по ISO 5211.

Потребитель ПАО «Газпром Автоматика» заинтересован в закупке преобразователей частоты и законченных электроприводов запорно-регулирующей арматуры мощностью от 0,25 до 7,5 кВт, с номинальным моментом до 10 000 Нм. ООО «Диотон» ведёт разработку взрывонепроницаемых корпусов для электроприводов фонтанной арматуры со встроенным энергонакопителем нормально закрытого типа мощностью 3 кВт, моментом до 300 Нм, не имеющей аналогов в РФ.

Исходная конструкция прототипа

Исходным прототипом электропривода задвижки, на основе которой компанией ООО «Диотон» разрабатывался усовершенствованный промышленный образец корпуса EV-Drive (рис. 1), являлся электропривод пр-ва ООО «Мехатроника Томск» [1, 2, 3], детали корпуса которого были целиком выточены и отфрезерованы из цельных заготовок алюминиевого сплава марки 2024 (согласно стандарту США) по аналогии с импортозамещаемыми изделиями. Сплав 2024 является исходным для создания Д16 и служит его полным эквивалентом как по химическому составу, так и по режимам термообработки. Анализ стоимости и технологичности изготовления корпусных деталей показал, что в России подобные детали можно изготовить токарно-фрезерной обработкой из основных высокопрочных сплавов – Д16, АМг6 и АМг5, а также литейных сплавов. Однако материалоемкость и время, необходимое для токарно-фрезерных работ, являются избыточными для изготовления тонкостенных корпусных деталей, и необходимо по возможности упростить и удешевить технологию их изготовления. Важным

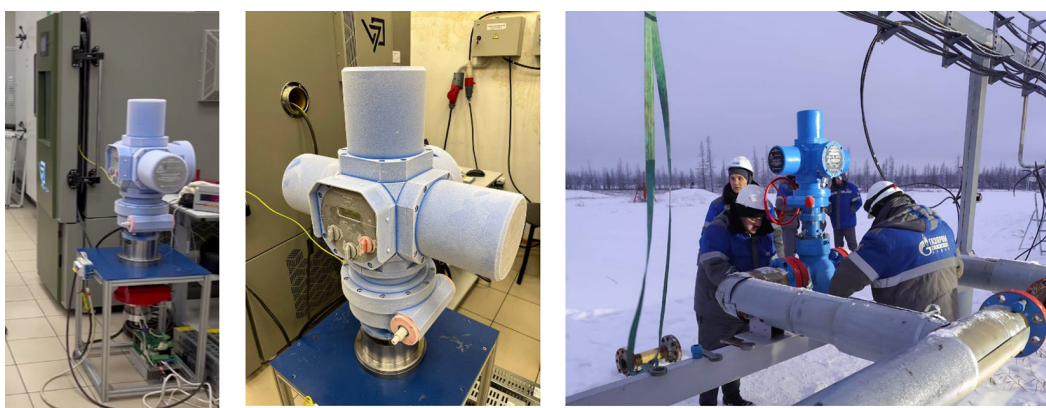


Рис. 1. Климатические и полевые испытания ЭП EV-drive

Fig. 1. Climatic and field tests of the EV-drive EP

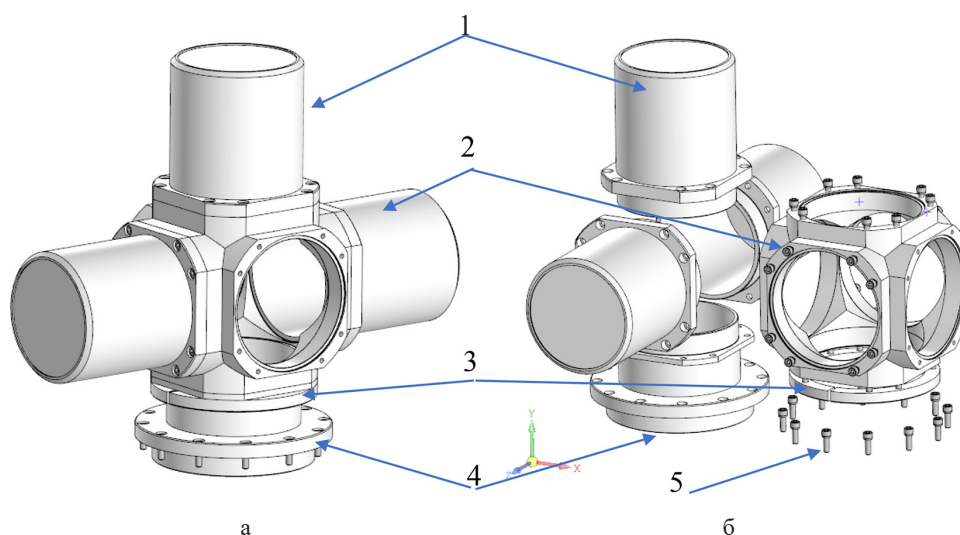


Рис. 2. Основные элементы взрывонепроницаемого корпуса: а – в собранном виде; б – с разнесенными деталями

Fig. 2. The main elements of the explosion-proof housing: а – assembled; б – with spaced parts

требованием, кроме прочих, является обеспечение надёжности резьбового соединения болтов в теле корпуса в соответствии с отраслевым стандартом ГОСТ Р 52857.4–2007 и эксплуатационная надёжность при многократном откручивании болтов.

Исходная конструкция корпуса электропривода задвижки состоит из следующих основных элементов (рис. 2)

Корпус, как показано на рис. 2, имеет следующие детали: 1 – корпус; 2 – корпус верхний; 3 – полукольцо; 4 – корпус промежуточный; 5 – Винт DIN 912 – M8x1.25x25 8.8 ГОСТ Р 52646–2006.

Фланцевые соединения деталей электропривода задвижки являются герметичными и должны предотвращать утечку газа при прорыве его из трубы через задвижку в корпус и наружу, а также должны исключать попадание атмосферной влаги внутрь. Рабочее давление газа на газораспределительных станциях составляет порядка 1.2 МПа, однако при проверке на взрывобезопасность установлено испытательное статическое давление $1,5 \text{ МПа} \pm 0,025 \text{ МПа}$, которое должна выдерживать взрывонепроницаемая оболочка оборудования согласно ГОСТ ИЕС 60079–1–2013 и, соответственно, корпус электропривода и фланцевые соединения.

Расчет прочности корпуса электропривода необходимо вести по ГОСТ 34233.1–2017, который предписывает нормы и методы расчета на прочность сосудов и аппаратов, в том числе нефтехимической и нефтеперерабатывающей отрасли, работающих под избыточным давлением. Указанным стандартом (п. 4.3) для алюминия и его сплавов устанавливается критерий прочности согласно теории максимальных касательных напряжений, а п. 4.5.7 устанавливает, что численный расчет может производиться как в упругой, так и упругопластической постановке.

Причиной разрушения в соответствии с теорией максимальных касательных напряжений (третьей теорией прочности) являются деформации сдвига, вызванные касательными напря-

жениями. При этом максимальное касательное напряжение для многоосного напряжённого состояния вычисляется по формуле [4]:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2},$$

а допускаемое значение для касательных напряжений при осевом напряжении:

$$|\tau| = \frac{|\sigma|}{2},$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения вдоль осей, а σ – допускаемое напряжение при одноосном растяжении.

Допускаемое напряжение $[\sigma]$ при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов, работающих при статических однократных нагрузках в указанном стандарте, вычисляют по формуле:

$$[\sigma] = \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_{p1.0/t}}{n_T}; \frac{R_{m/t}}{n_B}; \frac{R_{m/10^n/t}}{n_D}; \frac{R_{p1.0/10^n/t}}{n_{II}} \right\},$$

где $R_{p1.0/t}$ – минимальный условный предел текучести при остаточном удлинении 1 % при расчетной температуре; $R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления разрыву (предел прочности) при расчетной температуре; $R_{m/10^n/t}$ – среднее значение предела длительной прочности при растяжении для ресурса 10^n ч при расчетной температуре; $R_{p1.0/10^n/t}$ – средний 1 %-ный предел ползучести при растяжении за 10^n ч при расчетной температуре; $n_T = 1.5$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести в рабочих условиях; $n_B = 2.4$ – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению разрыву (запас по пределу прочности); $n_D = 1.5$ – коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности; $n_{II} = 1$ – коэффициент запаса прочности по пределу ползучести; $\eta = 1$ – поправочный коэффициент.

Существенной проблемой при оценке допускаемого напряжения по минимальной величине из представленных выше является наличие достоверных измеренных значений для длительной прочности – $R_{m/10^n/t}$ и $R_{p1.0/10^n/t}$, которые сложно получить, особенно для вновь проектируемого изделия, поэтому при отсутствии данных о пределе текучести и длительной прочности допускаемое напряжение для алюминия и его сплавов вычисляют по формуле:

$$[\sigma] = \frac{R_{m/t}}{n_{ВП}},$$

где $R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления разрыву (предел прочности) при расчетной температуре, а $n_{ВП}$ – коэффициент запаса по пределу прочности для алюминия и его сплавов, который составляет 3.5 и 7 для деформируемых и литейных сплавов соответственно.

Для условий испытания сосудов из алюминия допускаемое напряжение вычисляют по формуле:

$$[\sigma]_{II} = \frac{R_{m/20}}{n_{ВП}},$$

где $R_{m/20}$ – минимальное значение временного сопротивления разрыву при температуре 20 °С.

Таким образом, при эксплуатации при температуре 20 °С и близких температурах $[\sigma]$ и $[\sigma]_{\text{н}}$ эквивалентны.

При этом для напряжений сдвига должны выполняться следующие требования:

для средних по сечению сдвигающих напряжений: $\tau_{\text{ср}} \leq 0.5 [\sigma]$,

для максимальных сдвигающих напряжений: $\tau_{\text{max}} \leq 0.8 [\sigma]$.

Считая, что при температуре эксплуатации 20 °С $R_{\text{m/t}}$ и $R_{\text{m/20}}$ совпадают, и обратившись к табл. Б.11 указанного стандарта, а также к [5], ГОСТ 17232–99 и ГОСТ 1583–93, можно составить таблицу (табл. 1) с допускаемыми напряжениями для основных алюминиевых сплавов,

Таблица 1. Допускаемые напряжения для различных сплавов

Table 1. Permissible stresses for various alloys

Алюминиевый сплав	Временное сопротивление $R_{\text{m/t}}$ или $\sigma_{\text{в}}$ (минимальное значение), МПа	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа	Максимальное сдвигающее допустимое напряжение τ_{max} , МПа
Д16	245	70	56
АМг5М, АМг6М	260	74	59
АМг2М, АМг3М	170	48	38
АК12	137	19	15
АК9	157	22	17
АК7	127	18	14

которые могут использоваться для производства корпусов, при этом беря минимальные значения из диапазона для каждого сплава.

При проведении расчетов указанный стандарт предписывает использовать для алюминия и его сплавов модуль продольной упругости $E = 0.72 \times 10^{11}$ Па. Коэффициент Пуассона можно принять равным 0.34 в соответствии с [5].

На основе указанных критериев прочности можно провести расчет исходной детали Корпус и ее оптимизацию в части материалоемкости, технологичности и применяемого материала.

Расчет и оптимизация детали Корпус

Деталь Корпус является важной деталью взрывозащитной оболочки электропривода в целом и предназначена для размещения электронных компонент и автономных элементов питания. Основным функциональным назначением является защита элементов питания и плат управления от внешних воздействий и обеспечение герметичности, при этом к данной детали существенной силовой нагрузки не приложено. Деталь Корпус имеет следующую конструкцию и размеры, представленные на рис. 3 в разрезе 1/8 части по плоскостям симметрии.

Крепеж к центральному элементу Корпус верхний осуществляется болтами через фланец с отверстиями $\varnothing 9$ мм и цековкой под головку болта $\varnothing 15$ мм.

Для расчета напряженно-деформированного состояния данной детали с учетом фланцевого болтового соединения можно использовать следующие допущения и упрощения:

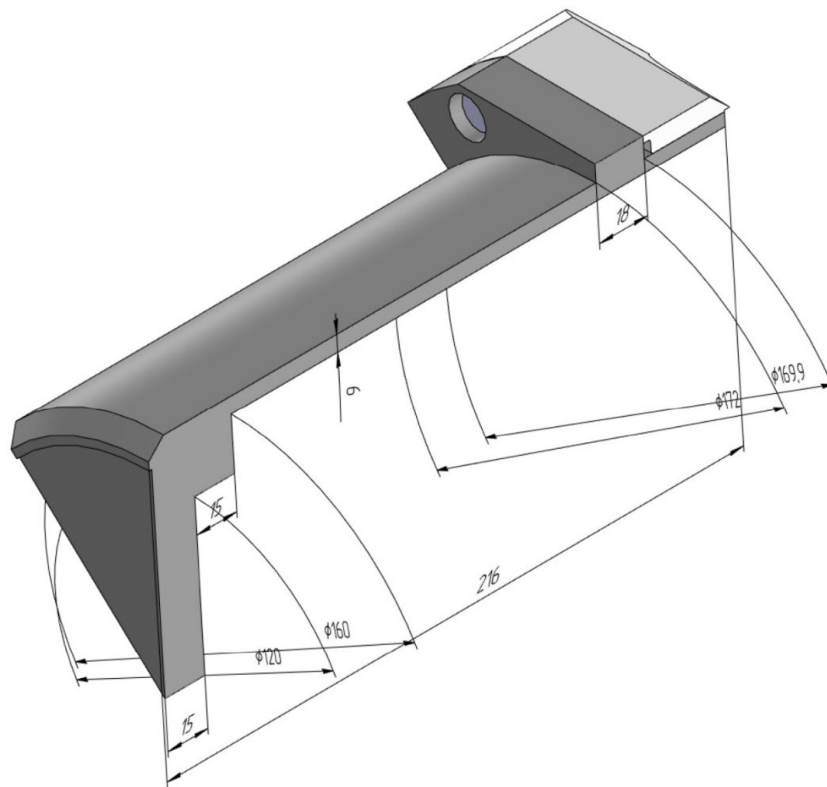


Рис. 3. Деталь Корпус в разрезе 1/8 часть

Fig. 3. The body part in the 1/8 section

– модель имеет 4 плоскости симметрии для детали Корпус и 4 плоскости симметрии для соединенного с ней детали Корпус верхний, ввиду того что он имеет дополнительные плоскости симметрии, проходящие через центр и противоположные ребра куба, из которого изготавливается деталь Корпус верхний.

Форма болта упрощена с исключением резьбовой части. Тело болта с резьбой представлено цилиндром, имеющим диаметр по впадинам резьбы и, соответственно, резьбовое отверстие в корпусе аналогично.

С учетом симметрии данной задачи граничные условия можно задать следующим образом (рис. 4):

- для всех внутренних поверхностей А, находящихся под действием испытательного давления, $p = 1.5 \text{ МПа}$;
- для свободных частей резьбовых тел болтов задана предварительная сила натяжения (сила затяжки) $F_z = 1000 \text{ Н}$ вдоль оси на каждый болт;
- собственная сила тяжести для тела детали.

Постановка задачи

Для корректного решения при контактном взаимодействии между болтами и резьбой в детали Корпус верхний (рис. 5) использовался метод «склеенного» контакта (типа bonded), когда

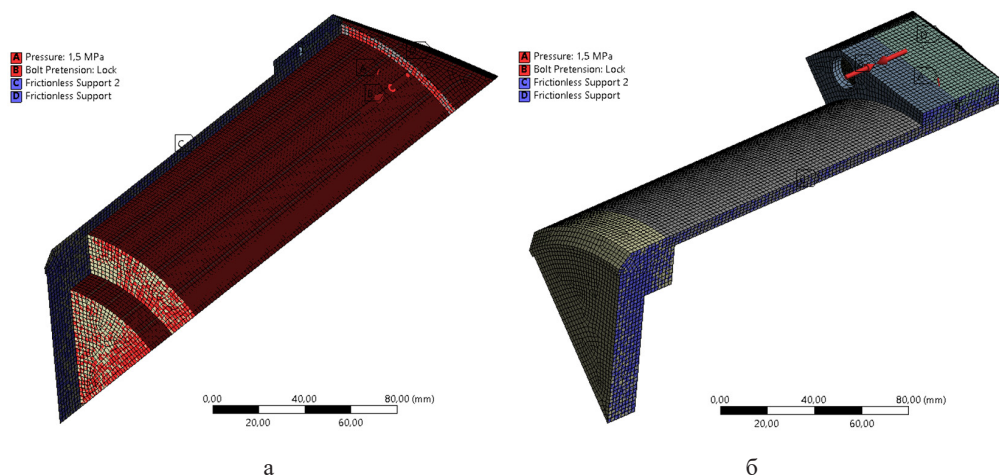


Рис. 4. Сетка конечных элементов и наложенные граничные условия

Fig. 4. Finite element grid and imposed boundary conditions

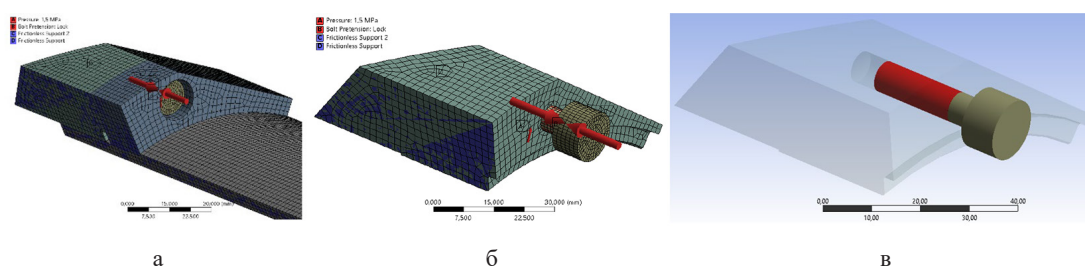


Рис. 5. Область решения контактной задачи для резьбового соединения

Fig. 5. The area of solving the contact problem for the threaded connection

перемещения δ на общей цилиндрической поверхности (по диаметру впадин резьбы) контакта между болтом и Корпусом верхним эквивалентны (рис. 5в). Для решения задачи контактного взаимодействия между головкой болта и фланцем детали Корпус, а также во фланце между деталью Корпус и Корпус верхний использовался алгоритм разделяющегося контакта (типа frictional) в Лагранжевой постановке и с коэффициентами трения 0.16 соответственно [6, 7, 8].

Результаты решения для исходной детали Колпак

В результате численного решения статической задачи была получена достоверная картина напряженно-деформированного состояния, хорошо согласующаяся с реальным поведением детали. При этом величины перемещений и напряжений, полученные при испытательном давлении $p_n=1.5$ МПа, могут быть уменьшены на 20 % и, таким образом, получены величины при рабочем давлении $p_p=1.2$ МПа ввиду того, что материал работает в упругой области линейного диапазона «деформация-напряжение».

Перемещения в детали Корпус имеют максимальные значения на закрытом торце на оси и составляют ~ 0.127 мм (рис. 6а).

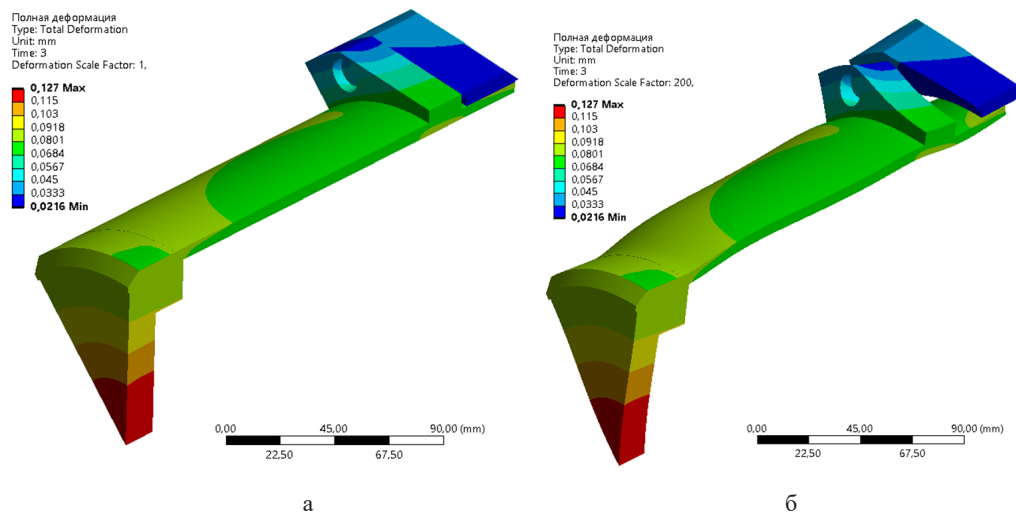


Рис. 6. Деформация в модели (суммарные перемещения) при испытательном давлении

Fig. 6. Deformation in the model (total displacement) at test pressure

Для более наглядного понимания того, как ведет себя деталь Корпус под нагрузкой, в том числе как происходит раскрытие стыка фланца и изгиб болтов, можно обратиться к картине деформаций в масштабе (рис. 6б, рис. 7).

Деформация в масштабе наглядно показывает характер формоизменения и корректно отражает реальную картину. Так, в местах соединения болтов с деталью Корпус верхний видно вытягивание металла вверх вслед за болтом и растягивающей нагрузкой, а также искривление головки и тела болта под действием несимметричной растягивающей силы, прикладываемой к фланцу.

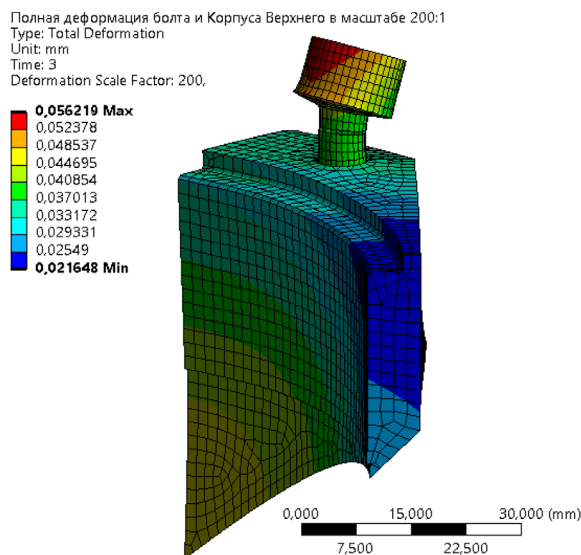


Рис. 7. Деформация (суммарные перемещения) в масштабе 200:1 при испытательном давлении

Fig. 7. Deformation (total displacement) on a scale of 200:1 at test pressure

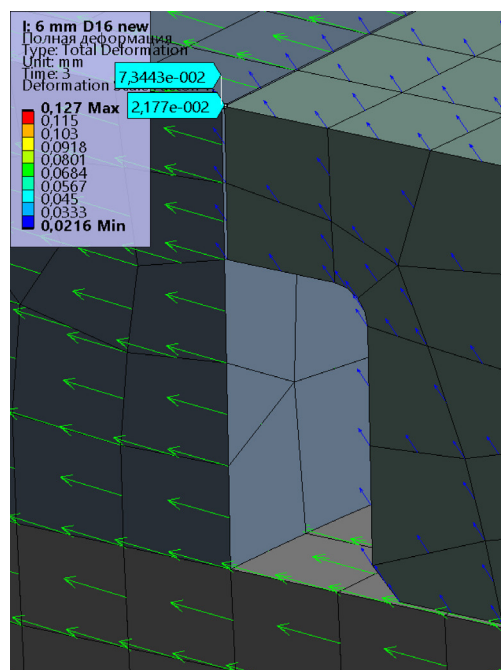


Рис. 8. Раскрытие стыка во фланцевом соединении при испытательном давлении

Fig. 8. Opening of the joint in the flange connection at test pressure

Важным критерием работоспособности фланцевого соединения является раскрытие стыка фланца, которое не должно превышать допускаемых величин и исключать разгерметизацию. На рис. 8 показано раскрытие стыка и перемещение крайних вершин, мм.

Характерное расстояние между противоположными точками в стыке не превышает $\delta \sim 0.052$ мм, что с учетом упругой деформации прокладки не выше допускаемых значений.

Оценка прочности детали Корпус должна производиться на основе анализа максимальных касательных напряжений. Распределение напряжений по телу детали показано на рис. 9. На рис. 9а и 9б видно, что максимальные напряжения концентрируются в области фланца – 45 МПа и в области закрытого торца – 26 МПа. Места с наибольшими напряжениями расположены в местах затяжки болтов – на поверхностях под их головками (рис. 9г), и локально достигают наивысших значений ~ 79 МПа.

Для детали Корпус верхний распределение напряжений представлено на рис. 10, из которого видно, что наибольшие напряжения локализованы вблизи плоскости симметрии и верхних витков резьбы. Неравномерное распределение напряжения в резьбовом соединении с повышением его от нижних к верхним виткам хорошо согласуется с классической теорией Н. Е Жуковского о неравномерном нагружении витков резьбы из-за распределённой упругой деформации болта и свидетельствует о корректности выбранной модели контактного алгоритма для аппроксимации резьбового соединения.

По результатам расчета исходной детали при нагрузке испытательным давлением максимальные напряжения в области фланца составляют $\tau = 45$ МПа. При данном напряжении все указанные сплавы в сводной табл. 1 имеют коэффициент запаса прочности значительно выше

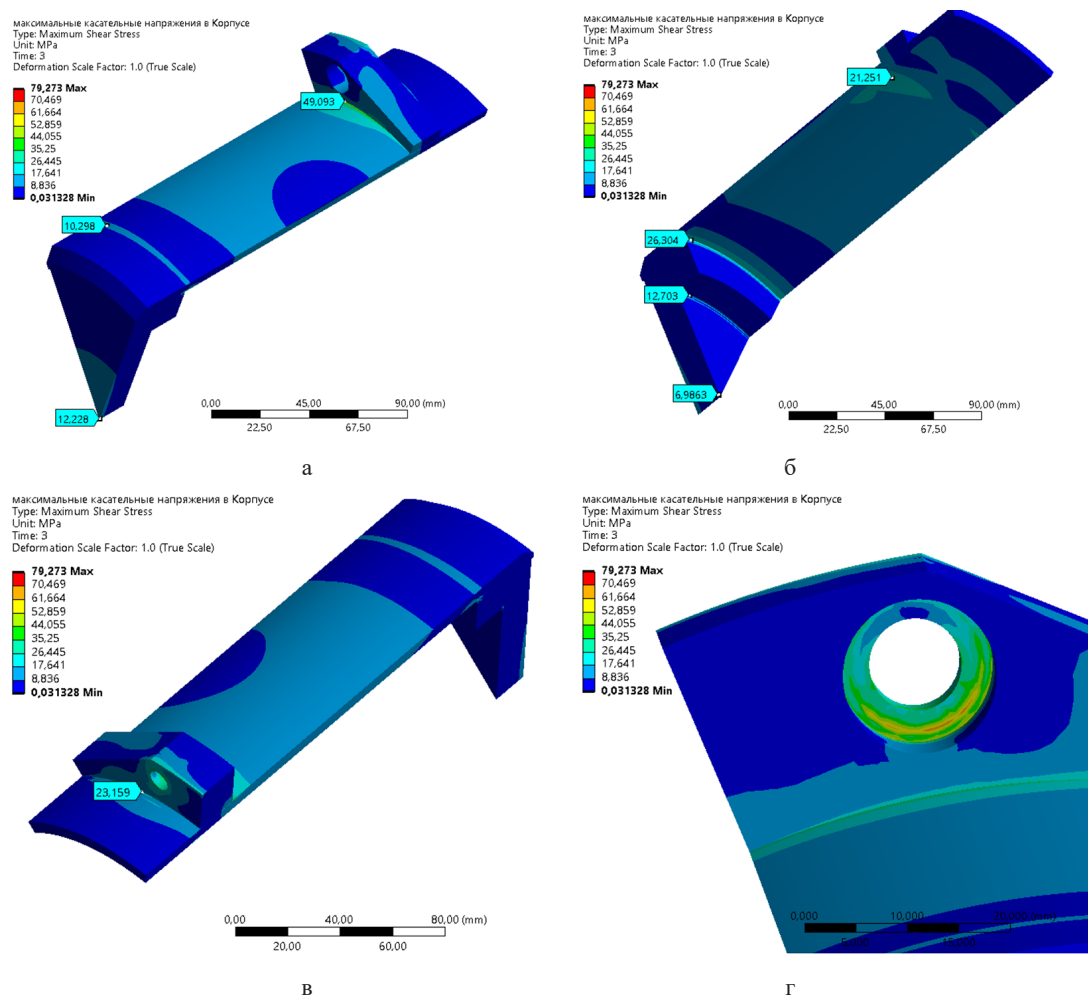


Рис. 9. Распределение максимальных касательных напряжений в детали Корпус при испытательном давлении

Fig. 9. Distribution of maximum tangential stresses in the housing part at test pressure

1, при этом наименьший запас прочности $n=2.65$ будет иметь сплав Аг9, что достаточно для кратковременной нагрузки.

Относительно высокие напряжения под головкой болта $\tau = 79$ МПа находятся ниже предела текучести материалов и являются локальными и точечными характерными напряжениями в болтовых фланцевых соединениях и не значимы для задачи данного расчета.

Рабочее давление, которое на 20 % ниже испытательного, создаст максимальное напряжение в области фланца $\tau = 36$ МПа, что дает возможность использовать все основные деформируемые сплавы – Д16, АМг6М, АМг5М, АМг3М и АМг2М согласно критериям прочности отраслевого стандарта ГОСТ 34233.1–2017 и сводной табл. 1, при этом обеспечивается необходимый запас прочности $n_{вп}=3.5$. Однако для указанной группы литейных сплавов допускаемые максимальные касательные напряжения τ_{max} более чем в 2 раза ниже, чем $\tau = 36$ МПа, и это не позволяет использовать их для производства данной детали. Учитывая, что указанный отраслевой стандарт

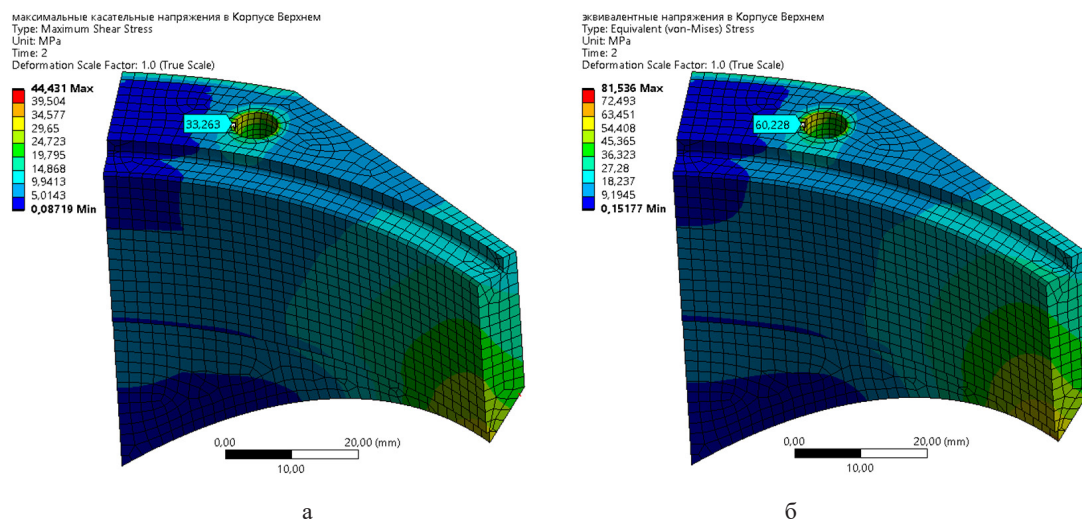


Рис. 10. Распределение максимальных касательных напряжений в детали Корпус верхний при испытательном давлении

Fig. 10. Distribution of maximum tangential stresses in the Upper housing part at test pressure

регламентирует коэффициент запаса $n_{\text{вн}}=7$ по допускаемым напряжениям для литейных сплавов, ввиду их высокой пористости и наличия литейных дефектов, использовать литейные сплавы при данной толщине возможно, но только при условии использования высокопрочных литейных сплавов, имеющих после термообработки детали (отжига) $\sigma_{\text{в}} \geq 315$ МПа, что является сложной технологической задачей, требующей использования высоколегированных сплавов.

Расчет оптимизированного варианта детали Корпус

С учетом большого запаса прочности, заложенного в исходный образец из сплава Д16, и большой материалоемкости токарно-фрезерной обработки из заготовки в виде цельного прутка $\varnothing 220$ мм и длиной 225 мм, которая, кроме того, имеет высокую стоимость, есть необходимость перехода к более технологически обоснованной конструкции.

Так, если перейти к изготовлению детали из листовой гнутой шовной трубы из материала АМГ5 или АМГ6 и использовать параметрическую оптимизацию [9,10,11], то можно получить деталь с конечной толщиной стенки 4 мм и отдельными свариваемыми фланцем и торцом, которая показана на рис. 11. В этом случае соединение торца с трубой можно осуществить аргонодуговой TIG сваркой стыковым швом с полным проплавлением, а фланец по верхней кромке закрепить лазерной сваркой с катетом шва 2 мм (рис. 11б), выполненной в среде аргона. Отличная свариваемость АМГ6 и отсутствие необходимости термообработки обеспечивают высокую технологичность сварочных работ [12,13]. При этом фланец устанавливается на трубу с посадкой с натягом и упирается нижним краем в уступ высотой 0.45 мм, что в совокупности с лазерной сваркой обеспечивает жесткую фиксацию фланца и передачу усилия на фланец с обоих краев – с верхнего и нижнего.

Используя условия задачи и ее постановку, аналогичные исходной детали Корпус, мы можем получить аналогичные результаты для ее оптимизированного варианта при



6



6

Видно, что в измененной детали характер перемещений аналогичен изначальной с небольшим увеличением перемещения в центре закрытого торца $\delta = 0.156$ мм по сравнению с $\delta = 0.127$ мм в изначальном варианте, но это не является существенным.

Характерное расстояние между противоположными точками в стыке немного увеличилось до $\delta \sim 0.065$ мм (рис. 13), по сравнению с первоначальным вариантом $\delta \sim 0.052$ мм, но тем не менее, не превышает допустимых величин.

При рабочем давлении величина перемещений и раскрытия стыка будет меньше на 20 % ввиду пропорционального снижения давления.

В измененной детали, так же как и деформации, возросли напряжения, что показано на рис. 14. В области фланца, его верхнего края, где расположен сварной шов, напряжения при испытательном давлении 1.5 МПа возросли с $\tau = 45$ МПа до 53 МПа, а в области торца на внутренней части в месте сварки с трубой τ возросло с 26 МПа до 31 МПа. Максимальные контактные касательные напряжения аналогично расположены в местах под шляпками болтов, где τ возросло с 79 до 97 МПа, но их величины и расположение не являются существенными для расчета. Опираясь на критерии прочности, указанные ранее, и коэффициент прочности сварного шва 0.85, согласно таблице Д.2 из ГОСТ 34233.1–2017, можно определить допускаемое максимальное касательное напряжение в сварном шве $\tau_{\text{Cmax}} = \tau_{\text{max}} \times 0.85$, что для сплавов АМг6М и АМг5М составит $\tau_{\text{Cmax}} = 59 \times 0.85 = 50$ МПа.

При испытательном давлении максимальное $\tau = 53$ МПа расположено в зоне шва у фланца, при этом обеспечивается запас прочности $n=2,9$ для сплавов АМг6М и АМг5М, что достаточно для кратковременной нагрузки. При рабочем давлении 1.2 МПа максимальное расчетное напряжение в зоне сварного шва фланца будет $\tau = 42$ МПа, при котором сплавы АМг6М и АМг5М будут обеспечивать необходимый коэффициент запаса прочности $n_{\text{вп}}=3.5$.

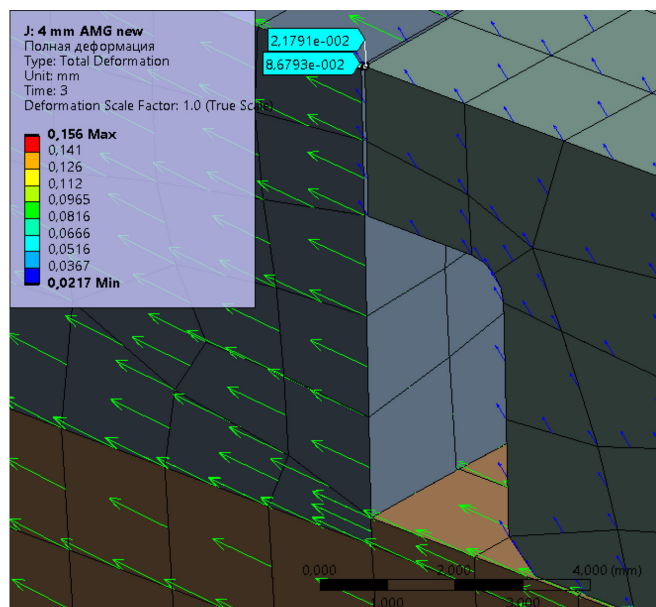


Рис. 13. Раскрытие стыка во фланцевом соединении для измененной детали Корпус

Fig. 13. Opening of the joint in the flange connection for the modified housing part

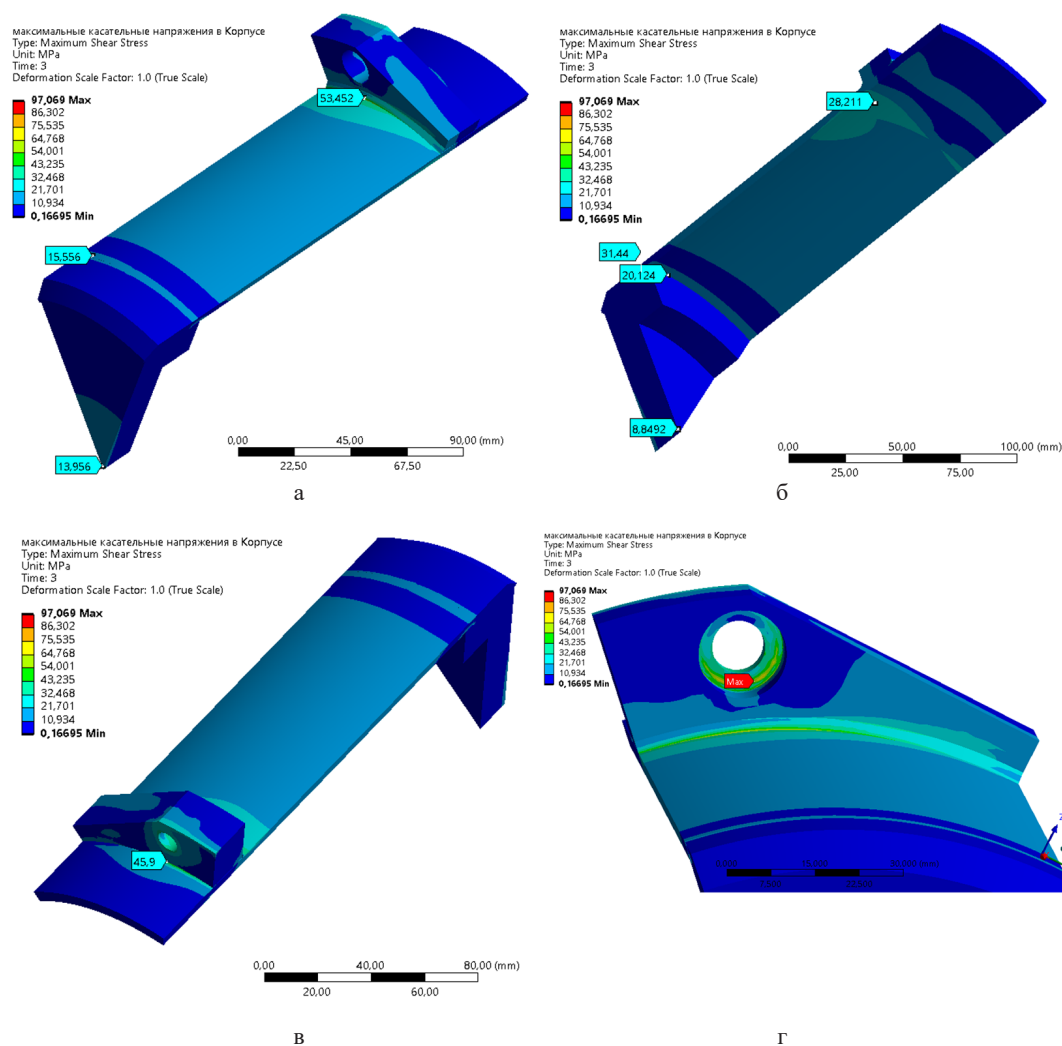


Рис. 14. Распределение максимальных касательных напряжений в модифицированной детали Корпус

Fig. 14. Distribution of maximum tangential stresses in the modified housing part

Процесс изготовления сварной оптимизированной детали

Основой для изготовления детали Корпус в оптимизированном варианте является гнутая шовная труба из листа с толщиной стенки 8 мм из сплава АМг6, которая гнется на валах до нужного диаметра, затем закрепляется в струбцинах и сваривается аргонодуговой Тиг-сваркой пруток из сплава АМг6, как показано на рис. 15а. Далее полученная трубная заготовка обрабатывается изнутри на токарном станке и сваркой сваривается с глухим фланцем (рис. 15б), при этом для сохранения цилиндричности во время работ могут использоваться надеваемые стальные кольца. Следующей операцией является обточка снаружи с формированием уступа (рис. 15в) и надевание фланца на полученный корпус с уступом с использованием посадки с натягом (рис. 15г д).



Рис. 15. Последовательность изготовления оптимизированной детали Корпус: а – трубная заготовка, согнутая из листа 8 мм на вальцах; б – сваренный цилиндрический корпус со сваренным торцом; в – токарная обработка; г и д – вид на готовую деталь Корпус

Fig. 15. The manufacturing sequence of the optimized body part: a – a tube billet bent from a sheet of 8 mm on rollers; b – a welded cylindrical body with a welded end; c – turning; d and e – a view of the finished body part

Выводы

В результате проведенного прочностного анализа и оптимизации формы детали Корпус были решены следующие задачи.

Была проведена оценка напряженно-деформированного состояния исходной детали из сплава Д16 с толщиной стенки 6 мм, на основе которого сделан вывод о возможности ее изготовления из деформируемых сплавов АМг6М, АМг5М, АМг3М и АМг2М путем токарно-фрезерной обработки, однако использование распространенных литейных сплавов – АК7, АК9, АК12 – невозможно для изготовления этой детали, ввиду более чем двукратно меньшего допускаемого напряжения для этих сплавов, чем требуется при рабочем давлении. При этом применение литейных сплавов возможно, но при использовании высокопрочных и высоколегированных сплавов с временным пределом прочности $\sigma_b \geq 315$ МПа.

Исходная деталь Корпус изготавливалась из заготовки массой 23,5 кг- круг $\varnothing 220$ мм и длиной 225 мм до готовой детали, имеющей массу 3.38 кг, путем токарно-фрезерной обработки. В отходы вторичной переработки и стружку уходило до 85 % (19,9 кг) массы заготовки при высоких удельных затратах. Немаловажным является и то, что после такой глубокой механической обработки этой тонкостенной детали зачастую внутренние напряжения в исходном круге Д16Т приводили к деформациям при обработке детали, что требовало отжига исходного круга из Д16Т, и связанной с этим значительной утрате прочностных свойств, так как Д16 в отожжённом состоянии перестает быть высокопрочным материалом, и при глубоком отжиге исходные характеристики могут снизиться со значений $\sigma_b \sim 345 \div 440$ МПа и $\sigma_T \sim 290 \div 245$ МПа до значений $\sigma_b \sim 245$ МПа и $\sigma_T \sim 100$ МПа, что особенно критично для более чем двукратного снижения предела текучести.

В результате расчета оптимизированной сборной детали, изготавливаемой из гнутой шовной трубы и отдельных торца и фланца, было установлено соответствие материалов детали – АМг6М и АМг5М критерию прочности по допустимому максимальному касательному напряжению, а также незначительное увеличение деформации в ключевых зонах детали. В связи с этим можно с уверенностью утверждать о сохранении достаточной прочности детали с улучшением ее технологичности и повышении коррозионной стойкости, ввиду того что сплав АМг6 более коррозионноустойчивый материал, чем Д16 [15,16].

Оптимизированная деталь имеет сниженную массу 2,88 кг и изготавливается из заготовок суммарной массой 9,7 кг, в отходы вторичной переработки уходит 70 % (6,8 кг) от массы заготовок. При этом материал оптимизированной детали может быть АМг6 или АМг5, которые не являются термоупрочняемыми и не существенно теряют свои свойства при отжиге, так АМг6М и АМг5М (отожжённое мягкое состояние) имеют согласно табл. 1 $\sigma_b = 260$ МПа при $\sigma_T \sim 160$ МПа, а в исходном нагартованном состоянии $\sigma_b/\sigma_T \sim 400$ МПа/300МПа, и для изготовления детали отжиг не требуется. Фланцевые части детали – торец и фланец, кроме круга, могут быть также изготовлены из листов и плит соответствующей толщины, что улучшает технологичность детали. Учитывая также более высокую коррозионную стойкость сплавов АМг6 и АМг5 по сравнению с Д16 и их прекрасную свариваемость, можно заключить, что использование сплавов АМг6 и АМг5 гораздо более предпочтительно, чем Д16 по технологическим показателям.

Список литературы / References

- [1] Патент № 226727 Российская Федерация, МПК F16K 31/05 (2006.01), F16K 49/00 (2006.01). *Электропривод трубопроводной арматуры*: № 2024108005: заявл. 25.03.2024: опубл. 19.06.2024 / Гусев Н. В., Одинопылов И. Г., Гавриловский В. И., Лихолат А. Д.; заявитель ПАО «Газпром» [Patent № 226727 RU, *Electric drive for pipeline valves*: No. 2024108005: declared 25.03.2024: published 19.06.2024 / Gusev N. V., Odnokopylov I. G., Gavrilovsky V. I., Likholat A. D.; applicant PJSC Gazprom (in Rus.)]
- [2] Чеканский А. В., Шишов Д. Н., Шакин В. В., Газизянов И. З., Гусев Н. В. Внедрение электромеханической схемы управления стволовыми и боковыми задвижками в составе устьевого оборудования на месторождениях ПАО «Газпром». *Газовая промышленность*, 2024, 7(868), 56–64 [Chekansky A. V., Shirshov D. N., Shakin V. V., Gazizyanov I. Z., Gusev N. V. Implementation of an electromechanical control circuit for wellhead and lateral valves as part of wellhead equipment at the fields of PJSC Gazprom. *Gas Industry*, 2024, 7(868), 56–64 (in Rus.)]

[3] Гусев Н., Однокопылов И. Электропривод регулирующей трубопроводной арматуры «ГУСАР». *Control Engineering Россия*, 2020, 1 (85), 25–27 [Gusev N., Odnokopylov I. Electric drive of control pipeline valves “GUSAR”. *Control Engineering Russia*, 2020, 1 (85), 25–27 (in Rus.)]

[4] Келлер И.Э., Петухов Д.С. *Критерии прочности и пластичности*. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. 157 с. ISBN 978–5–398–02429–6 [Keller, I.E., Petukhov D.S. *Strength and plasticity criteria*. Perm: Publishing house of Perm national research polytechnic university, 2020 (in Rus.)]

[5] *Марочник сталей и сплавов*. 7-е изд., стереот. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. М.: Инновационное машиностроение, 2021. 1216 с.: ил. ISBN 978–5–907104–51–8. [*Brand book of steels and alloys*. 7th edition, stereotyped / Yu. G. Dragunov, A. S. Zubchenko, Yu. V. Kashirsky et al. Under the general editorship of Yu. G. Dragunov and A. S. Zubchenko. Moscow, Innovatsionnoye mashinostroyeniye (in Rus.)]

[6] ANSYS Inc. *ANSYS Mechanical APDL: User's Guide* [Электронный ресурс]. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2023. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical-apdl>

[7] *Engineering Analysis with ANSYS Software*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. 551 p. ISBN 978–0–08–102164–4.

[8] *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2024*. South Lake Tahoe, CA: SDC Publications, 2024. 614 p. ISBN 978–1–63057–584–4.

[9] Абражевич Д.С., Алли А.Ш. Современные методы оптимизации при проектировании конструкций. *Электронные системы и технологии: сб. тез. докл. 56-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР*, Минск, 18–20 мая 2020 г. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Минск, 2020. 527–528. [Abrazhevich D.S., Alli A. Sh. Modern optimization methods in designing structures. *Electronic systems and technologies: collection of abstracts of reports of the 56th scientific conference of postgraduate, master's and undergraduate students of BSUIR*, Minsk, May 18–20, 2020. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Minsk, 2020. 527–528. (in Rus.)]

[10] Shakeri S. *Karamba3D: Parametric Structural Analysis*. London: Parametric Press, 2022. 220 p. ISBN 978–1–78548–312–6.

[11] *Structural Optimization in Ansys Mechanical* [Электронный ресурс]. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2025. URL: <https://ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>.

[12] Овчинников В.В., Лопаткин А.П. *Современные технологии сварки плавлением алюминиевых сплавов*. 2-е изд. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 372 с. ISBN 978–5–9729–1793–8 [Ovchinnikov V. V., Lopatkin A. P. *Modern technologies of fusion welding of aluminum alloys*. 2nd ed. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024. 372 p. (in Rus.)]

[13] Дриц А.М., Овчинников В.В. *Сварка алюминиевых сплавов*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Руда и Металлы, 2020. 472 с. ISBN 978–5–98191–088–3 [Drits A. M., Ovchinnikov V. V. *Welding of aluminum alloys*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Ruda i Metally, 2020. 472 p. (in Rus.)]

[14] Guiqiao Huang. Corrosion Behavior of Aluminum Alloys in Seawater. *Corrosion science and technology*, 2002, 31(3), 215-218.

[15] Shams Anwar .Corrosion behavior of aluminum alloys 2024 and 7075 under simulated marine environment. *Safety in Extreme Environments*. 2021, Volume 3, 237-251.

**Information and
Communication
Technologies**

**Информационно-
коммуникационные
технологии**



EDN: WOOLQA

УДК 004.451.5.052.4:621.395.4

Performance of IDMA System with Various Types of Interleavers

Mhnd Farhan*
Baghdad University
Baghdad, Iraq

Received 02.05.2025, received in revised form 04.05.2025, accepted 05.05.2025

Abstract. A widely recognized and efficient approach for managing burst errors involves executing the interleaving process prior to the transmission of data across a communication channel. This technique aims to mitigate the impact of burst errors by rearranging the order of the original message bits. Upon reception, the message bits are rearranged again to restore them to their original sequence. Consequently, the selection and design of suitable interleavers for advanced multiple-access techniques, such as interleave-division multiple-access (IDMA), present a significant challenge. This study investigates the system analysis and design of IDMA employing various types of interleavers. The performance of the IDMA system is evaluated utilizing Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation inunction with an Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel. The simulation outcomes indicate that the performance of IDMA across all interleavers is roughly equivalent.

Keywords: IDMA design, performance analysis, interleavers

Citation: Mhnd Farhan. Performance of IDMA System with Various Types of Interleavers. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(4), 558–567. EDN: WOOLQA



Производительность системы IDMA с различными типами интерлейверов

Мхнд Фархан

Багдадский университет

Ирак, Багдад

Аннотация: Широко распространенный и эффективный подход для борьбы с ошибками разрыва включает в себя выполнение процесса чередования перед передачей данных по каналу связи. Эта техника направлена на смягчение влияния ошибок разрыва путем изменения порядка следования исходных битов сообщения. После приема биты сообщения снова переставляются, чтобы восстановить их исходную последовательность. Следовательно, выбор и разработка подходящих перемежителей для современных технологий множественного доступа, таких как множественный доступ с разделением каналов (IDMA), представляют собой серьезную проблему. В данном исследовании рассматривается системный анализ и проектирование IDMA с использованием различных типов перемежителей. Производительность системы IDMA оценивается при использовании модуляции со сдвигом двоичной фазы (BPSK) в сочетании с каналом с аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN). Результаты моделирования показывают, что производительность IDMA при использовании всех чередований примерно эквивалентна.

Ключевые слова: проектирование IDMA, анализ производительности, перемежители.

Цитирование: Мхнд Фархан. Производительность системы IDMA с различными типами интерлейверов / Мхнд Фархан // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(4). С. 558–567. EDN: WOOLQA

1. Introduction

As the demand for high data rate services in wireless networks continues to increase, numerous challenging issues emerge when utilizing existing multiple access technologies. The primary difficulties associated with orthogonal multiple access (MA) technologies, such as TDMA, FDMA, and OFDMA, include their vulnerability to inter-cell interference and the necessity for frame synchronization to preserve orthogonality [1–5].

Recently, a novel variant of Code Division Multiple Access (CDMA), referred to as Interleave Division Multiple Access (IDMA), has emerged within the realm of wireless communication. The IDMA scheme utilizes interleavers as the sole method for user separation, thereby ensuring the privacy of user data. The central concept of IDMA involves interleaving the spread-coded information sequence of each layer with a distinct interleaver. This allows for simultaneous transmission of different layers on the same frequency, with subsequent separation achieved on the receiver's end [6–9].

IDMA represents an innovative technology designed to address the limitations associated with the traditional CDMA technique, specifically the issues of multiple access interference (MAI) and intersymbol interference (ISI). This is accomplished through the use of chip-level interleavers for user differentiation, while the receiver utilizes a straightforward chip-level iterative multiuser detector (MUD). In the context of CDMA, interleavers serve the purpose of enhancing coding gain. The fundamental concept of IDMA is that it distinguishes between users by employing unique interleavers, which must differ for each user.

In the IDMA framework, many of the challenges faced by CDMA are mitigated due to the implementation of user-specific interleavers, which serve as an alternative method for user separation, replacing the unitary spreading PN-sequences utilized in CDMA. The IDMA approach facilitates user separation through these user-specific interleavers, which exhibit low cross-correlation with one another. As the spread user data is processed through the user-specific interleavers, it leads to improved orthogonality among the resulting interleaved data transmitted over the channel. This orthogonality condition is crucial for minimizing the potential for collisions between interleavers within the channel [10–15].

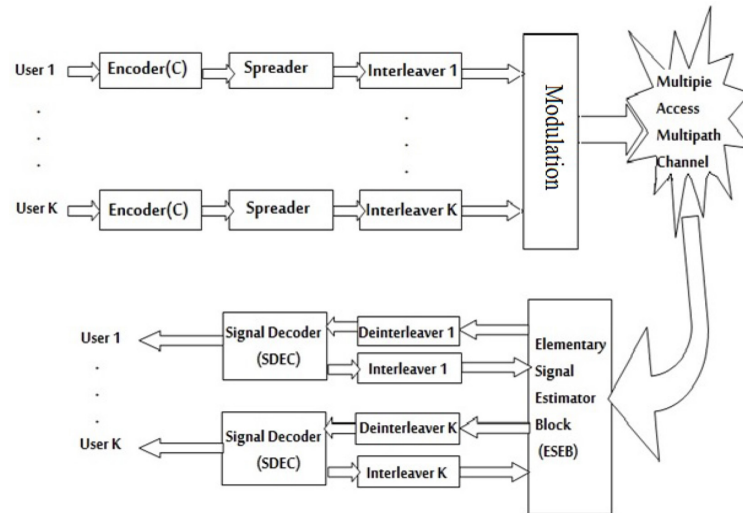


Fig. 1. IDMA System

Fig. 1 shows the block diagram of IDMA system with K simultaneous users. It consists of IDMA transmitter, multiple access multipath channel, and IDMA receiver. The transmitter and receiver are explained in details in the next sections

2. IDMA Transmitter

2.1. Encoder

This component encodes the input data sequence through a forward-error-correcting (FEC) encoder, which allows for a restricted amount of error detection and correction at the receiver without the need to retransmit the data stream. The FEC code can either be in the form of a block code or a convolutional code. The encoder may be excluded from the IDMA transmitter, resulting in an uncoded IDMA system. Conversely, if the encoder is included, the system is classified as a coded IDMA system.

2.2. Spreader

The spreader acquires a bit and disseminates it across a distance denoted by s , representing the length of the spreader. This dissemination process facilitates bandwidth expansion, and the choice of spreading sequences does not influence the performance of an IDMA system. A tangible advantage

of spreading in terms of data transmission range can be realized in environments characterized by frequency-selective fading. The augmented bandwidth of a spread signal enhances frequency diversity. This frequency diversity can only be effectively utilized if the signaling bandwidth significantly surpasses the correlation frequency, also known as the coherency bandwidth, of the channel. Consequently, in an IDMA system, the spreader can be uniformly configured for all users or alternatively substituted with a repetition encoder. The output generated by the spreader for the user k is C_k as follows:

$$C_k = [c_k(1), c_k(2), \dots, c_k(j), \dots, c_k(J)]^T, \quad (1)$$

where J is the frame length. The spreading sequences generated for IDMA should contain balanced number of $\{1, -1, 1, -1, \dots\}$.

2.3. Interleaver

The interleavers $\{\pi_k\}$, selected for the purpose of user separation, must maintain orthogonality among all users. These interleavers effectively distribute the coded sequences, ensuring that adjacent chips exhibit minimal correlation, thereby simplifying the chip-by-chip detection process at the receiver. The coded and spread sequence undergoes permutation through an interleaver, resulting in the subsequent sequence as follows:

$$X_k = [x_k(1), x_k(2), \dots, x_k(j), \dots, x_k(J)]^T, \quad (2)$$

where the element in x_k is denoted as “chips”.

The primary interleavers utilized in IDMA are the Random Interleaver (RI), Master Random Interleaver (MRI), Tree Based Interleaver (TBI), and Prime Interleaver (PI). The RI necessitates a significant amount of memory at both the transmitter and receiver sides, leading to substantial bandwidth usage for the transmission of these interleavers, as well as an increase in computational complexity at the receiver. The MRI addresses the issues of excessive bandwidth consumption and memory demands at both ends; however, it introduces a new challenge related to computational complexity due to the iterative calculations required for user-specific interleavers. The TBI is designed to reduce both computational complexity and memory requirements associated with the RI and MRI. Meanwhile, the PI aims to further decrease bandwidth and memory needs compared to its predecessors, although it presents a slightly higher complexity than that of the TBI.

In the following, the interleaving process for each interleaver type are discussed.

2.3.1. Interleaving Process

This procedure rearranges the input data according to an interleaver pattern, which is determined by the type of interleaver, as elaborated in the following sections.

2.3.1.1. Random Interleaver

This interleaver randomly rearranges the input. All interleaver configurations are retained in the receiver (base station) for subsequent use in the deinterleaving process.

2.3.1.2. Master Random Interleaver

Due to user- k , user-specific interleaver π_k can be generated as a particular combination of master interleaver such that $\pi_k \equiv \pi^k$. Only the master interleaver will be stored in the receiver (base station), and the number of users is transmitted to be used for deinterleaving process.

2.3.1.3. Tree based Interleaver

Two master interleavers are needed for Tree based interleaver, the first one is π_1 and the second is π_2 that are randomly generated. These interleavers are bound to have orthogonality between each other to ensure the minimal cross correlation between other generated user specific interleavers that use this interleaving algorithm. The allocations of the interleaving masks follow the tree format as shown in Fig. 2. User specific interleavers are designed using a combination of randomly selected master interleavers. The interleaver π_1 is opted for upper branch, while, π_2 is reserved for initiation for lower branch. Upper branch is selected for the case of odd user count while lower branch is selected for even user count.

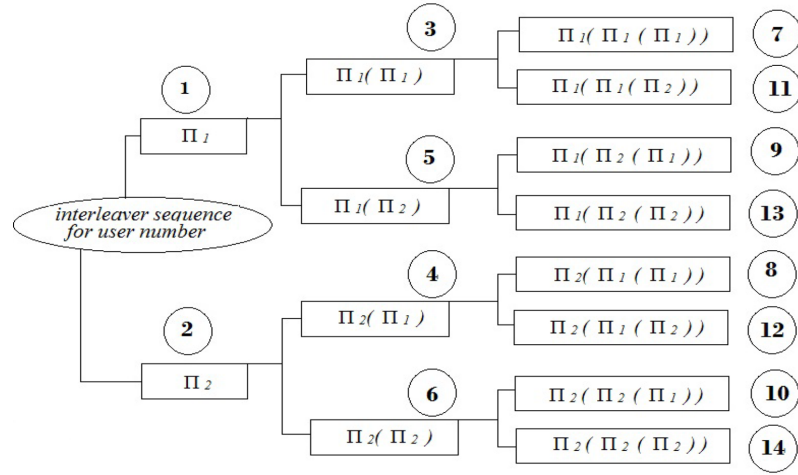


Fig. 2. Interleaving strategy for Tree Based Interleaving scheme

2.3.1.4. Prime Interleaver

The prime interleaver initially identifies a prime number within a specified range, determined by the interleaver length. Subsequently, it eliminates any prime numbers that are factors of a given value. This process yields the seed number, which represents the number of users. It is essential to transmit this seed to the receiver, enabling the generation of the deinterleaver pattern through the same formula utilized in the interleaving process. It is important to note that, unlike other interleaving mechanisms, the prime interleaver does not require memory to store interleaver patterns for each user.

3. IDMA Receiver

The IDMA receiver employs an iterative sub-optimal architecture. This structure includes an elementary signal estimator (ESE), a posteriori probability (APP) decoders (DECs), and a deinterleaver.

The data undergoes a predetermined number of iterations prior to making a definitive decision. Under the assumption of single path propagation, the multiple access and coding constraints are addressed independently within the ESE and DEC. The outputs generated by the ESE and DEC are extrinsic log-likelihood ratios (LLRs) about the transmitted signal.

$$e(x_k(j)) = \log \left(\frac{P(y/(x_k(j)) = +1)}{P(y/(x_k(j)) = -1)} \right), \quad \forall k, j \quad (3)$$

In Eq.3, the term representing the received channel output is associated with the ESE, whereas for the DEC, it is derived from the deinterleaved outputs of the elementary signal estimator (ESE) block. Subsequently, a global turbo-type iterative process is employed to process the LLRs produced by both the ESE and DEC blocks.

3.1. Basic Elementary Signal Estimator (ESE)

Assuming memoryless channel. After chip matched filtering, the received signal from K users for single path propagation can be written as:

$$r(j) = \sum_{k=1}^K h_k x_k(j) + n(j), \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (4)$$

where $x_k(j) \in \{+1, -1\}$ is the j th chip transmitted by user- k , the coefficient h_k for user- k represents the combined effect of power control and channel loss, and $\{n(j)\}$ are samples of an AWGN process with zero-mean and variance $\sigma^2 = N_0/2$. Assuming that the channel coefficients $\{h_k\}$ are known a priori at the receiver. Due to the use of random interleaver $\{\pi_k\}$, the ESE operation can be carried out in a chip-by-chip manner, with only one sample $r(j)$ used at a time.

$$r(j) = h_k x_k(j) + \xi_k(j), \quad (5)$$

$$\xi_k(j) = r(j) - h_k x_k(j) = \sum_{k' \neq k} h_{k'} x_{k'}(j) + n(j), \quad (6)$$

where $\xi_k(j)$ is the distortion (including interference-plus-noise) in $r(j)$ with respect to user- k . From the central limit theorem, $\xi_k(j)$ can be approximated as a Gaussian variable, and $r(j)$ can be characterized by a conditional Gaussian probability density function:

$$P\left(\frac{r(j)}{x_k(j)} = \pm 1\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \text{Var}(\xi_k(j))}} \exp \left(-\frac{\left(r(j) - (\pm h_k + E(\xi_k(j))) \right)^2}{2\text{Var}(\xi_k(j))} \right), \quad (7)$$

where $E(\cdot)$ and $\text{Var}(\cdot)$ are the mean and variance functions, respectively. The following is the ESE detection algorithm based on Eqs.5&7, assuming that the a priori statistics $\{E(\xi_k(j))\}$ and $\{\text{Var}(\xi_k(j))\}$ are available.

Algorithm 1: Chip by chip (CBC) detection

Step (i): Estimation of Interference Mean and Variance

$$E(r(j)) = \sum_k h_k E(x_k(j)) \quad (8)$$

$$\text{Var}(r(j)) = \sum_k |h_k|^2 \text{Var}(x_k(j)) + \sigma^2 \quad (9)$$

$$E(\xi_k(j)) = E(r(j)) - h_k E(x_k(j)) \quad (10)$$

$$\text{Var}(\xi_k(j)) = \text{Var}(r(j) - |h_k|^2 \text{Var}(x_k(j))) \quad (11)$$

Step (ii): LLR Generation

$$e_{ESE}(x_k(j)) = 2h_k \frac{r(j) - E(\xi_k(j))}{\text{Var}(\xi_k(j))}. \quad (12)$$

3.2. Iterative Interleaving / Deinterleaving Operation

This operation is integral to the iterative decoding process, which significantly elevates the computational complexity at the receiver's end. The complexity escalates considerably when the number of users is large. The ESE produces metrics that undergo deinterleaving prior to being fed into the soft-in/soft-out (SISO) decoder. The soft output generated by the decoder is then interleaved and utilized by the ESE in the subsequent iteration as a priori information, thereby enhancing the output metrics and perpetuating the process. Ultimately, a hard output decision is rendered by the decoder during the final iteration. Interleaving and deinterleaving are employed between the ESE and the decoder to mitigate correlations between the receiver and decoding operations.

3.2.1. Deinterleaving Process

Following the demodulation process, the sequences for the deinterleaver are produced. The method of generating these deinterleaver sequences is contingent upon the specific type of interleaver, as elaborated in the subsequent discussion.

3.2.1.1. Random Interleaver

The random interleaver creates deinterleaver patterns by utilizing the interleaver patterns that have already been stored. It assesses the value of vector (**e**) in relation to the positions of their occurrence within the interleaver patterns. The vector (**e**) is defined as a row vector, where the interleaver length is denoted as. The deinterleaver sequence rearranges the received sequences to produce the spread sequences, which correspond to the chip sequences transmitted.

3.2.1.2. Random Master Interleaver

The deinterleaver pattern is generated based on the number of users by utilizing the pre-existing master interleaver patterns. This is achieved by comparing the values in the (**e**) vector with the locations of the master interleaver within itself. The resulting deinterleaver pattern rearranges the received sequences to produce the spread sequences, which correspond to the chip sequences transmitted.

3.2.1.3. Tree Based Interleaver

Based on the two master interleaver patterns that are already stored at the receiver, we create the appropriate deinterleaver patterns according to the number of users. The received signal is rearranged using the deinterleaved patterns.

3.2.1.4. Prime Interleaver

The deinterleaver patterns are generated using the same formula as the interleaving process, contingent upon the seed number, which corresponds to the user. Following the deinterleaving process, the spread sequences are utilized in the decoding process, thereby restoring the original data.

3.3. Signal Decoder (SDEC)

The SDEC in Fig.1 carries out a posteriori probability (APP) decoding using the output of the ESE as the input. With binary phase shift keying (BPSK) signaling, its output is the extrinsic log-likelihood ratios (LLRs) $\{e_{DEC}(x_k(j))\}$ of $x_k(j)$ defined in Eq.3, which is used to generate the following statistics. In the iterative process, ESE and SDEC exchange the extrinsic information about $x_k(j)$.

$$e_{DEC}(x_k(\pi(j))) = \sum_{j=2}^S e_{ESE}(x_k(\pi(j))) \quad (13)$$

$$E(x_k(j)) = \tanh(e_{DEC}((x_k(j))/2)) \quad (14)$$

$$Var(x_k(j)) = 1 - (E(x_k(j)))^2. \quad (15)$$

The chip by chip (CBC) detection for IDMA scheme can be concluded as follows:

1. Elementary signal estimator generates $e_{ESE}(x_k(j))$ by Eq.12 for decoder DEC- k .
2. DEC- k generates $e_{DEC}(x_k(\pi(j)))$, which are used to update mean and variance of $x_k(j)$.

Under the assumption that $\{x_k(j)\}$ are independent, Eqs.8&11 are a straightforward consequence of Eq.5&6. The Step (ii), shown in algorithm 1, is obtained by evaluating Eq.3 based on Eq.7. The operations in Eqs.8 &9, i.e., generating $E(r(j))$ and $Var(r(j))$, are shared by all users, costing only three multiplications and two additions per coded bit per user. Overall, the ESE operations shown in step (i) and step (ii), cost only seven multiplications and five additions per coded bit per user, which is very modest. Interestingly, the cost per information bit per user is independent of the number of users K . This is considerably lower than that of other alternatives.

4. Simulation Results

Tests of computer simulation have been conducted on the system depicted in Fig. 1, utilizing $K=30$ and a data length of 512 bits, with BPSK modulation and a single-path AWGN channel. The simulations incorporated four different interleavers.

The performance results, illustrated in Fig. 3, present the relationship between bit error rate (BER) and signal-to-noise ratio (E_b/N_0) for the IDMA system. The performance of the four interleavers appears to be nearly identical, although TBI and PI exhibit slightly superior performance. This observation aligns with the design objective of all interleavers, which is to achieve a comparable bit error rate. The primary distinctions among the interleavers pertain to their memory requirements, bandwidth demands, and computational complexity, as previously outlined in Table 1.

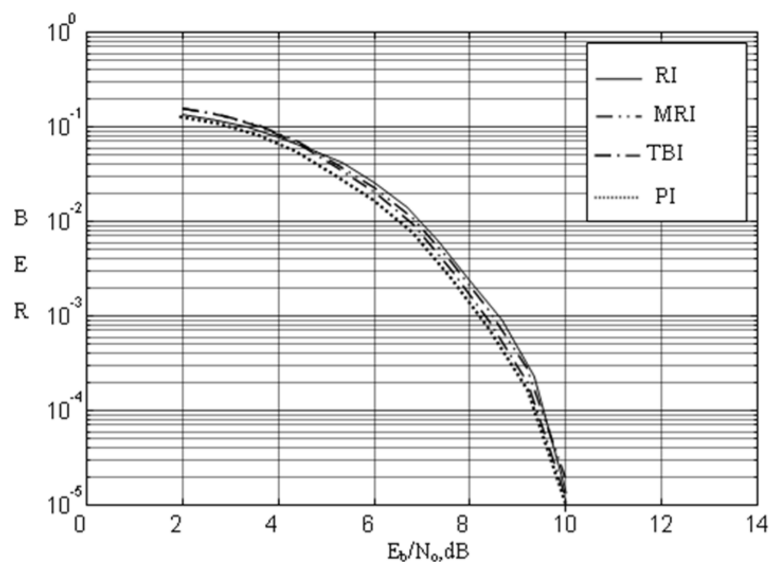


Fig. 3. Error performance

References

- [1] Ping L. et al. Interleave division multiple access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(4), 938–947.
- [2] Pupeza I. et al. Efficient generation of interleavers for IDMA. *Proc. IEEE International Conference on Communications, ICC*, 2006, 4, 1508–1513,
- [3] Wu H. et al. User-specific chip-level interleaver design for IDMA system, *Electronics Letters*, 2006, 42(4).
- [4] Hao D et al. Analysis and design of interleaver sets for interleave-division multiplexing and related techniques. *Proc. 5th International Symposium on Turbo Codes and Related Topics*, 2008, 432–437.
- [5] Shukla M. et al. Analysis and design of optimum interleaver for iterative receivers in IDMA scheme. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2009, 9(10), 1312–1317.
- [6] Shukla M. et al. Simple diversity scheme for IDMA communication system. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2009, 4(6), 877–883.
- [7] Shulka M. *Performance evaluation of IDMA scheme in wireless communication*. Ph.D Dissertation, Dept. of Electronics and Communication Eng., Motilal Nehru National Institute of Technology, India, 2010.
- [8] Gupta K. et al. Iterative IDMA receivers with random and tree based interleavers. *Journal of Information Engineering and Applications*, 2011, 1(3).
- [9] Choudhary K., Sharma P.S. Interleavers for IDMA technology: A comparison survey. *International journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2012, 1(2), 55–61.
- [10] Yadav M. and Banerjee P. Bit error rate analysis of various interleavers for IDMA scheme. *3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, India, 2016. 89–94.

- [11] Shah C. R. A Study on Interleave Division Multiple Access. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 2018, 2(1), 180–183.
- [12] Hu Y., Liang C., Liu L., Yan C., Yuan Y. and Ping L. Interleave-Division Multiple Access in High Rate Applications. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2), 476–479.
- [13] Sony D., Keerthi P., Aditya O. and Sravya N. Simulation and Performance Analysis of Interleave Division Multiple Access (IDMA) in Comparison with Code Division Multiple Access (CDMA). *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, 2021, 5(2), 90–94.
- [14] Prasad J. Comparative Analysis of Optical Interleave Division Multiple Access using Helical and Random Interleaver. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(11), 1–6.
- [15] Upadhyay A. Comparative Study of US-IDMA and IDMA using Convolutional Code with Prime. *Nanotechnology Perceptions*, 2024, 20(7), 1941–1950.