

ISSN 1813-8225 (Print)
ISSN 2541-7541 (Online)

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

2025

№ 3 (195)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 3 (195) 2025

УЧРЕДИТЕЛИ:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Свидетельство о регистрации
ПИ № ТУ55-00559 от 06.10.2017 г.
выдано Управлением Роскомнадзора
по Омской области

Сайт журнала:
<https://journals.omgту.ru>

Страница журнала на сайте учредителя:
[http://www.omgту.ru/
general_information/media.omgту/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media.omgту/journal_of_omsk_research_journal/)

Подписной индекс
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь
М. Ф. Федорчук

Редактор
Т. П. Семина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов

© Редакция журнала
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 11.09.2025 г.
Дата выхода в свет 22.09.2025 г.

Формат 60x84 1/8.
14,42 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 60
Цена свободная

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

КРОПОТИН Олег Витальевич, главный редактор, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ОВЧАРЕНКО Сергей Михайлович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ГАЛИЕВ Ильхам Исламович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

АВДЕЕВА Диана Константиновна, д. т. н., профессор,
Томский политехнический университет, г. Томск

АЮШЕЕВ Тумэн Владимирович, д. т. н., доцент,
Восточно-Сибирский университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

БУБНОВ Алексей Владимирович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ВАВИЛОВ Владимир Платонович, д. т. н., профессор,
Томский политехнический университет, г. Томск

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ГРАДОБОВЕВ Александр Васильевич, д. т. н., профессор,
Томский политехнический университет, г. Томск

КАРПОВ Валерий Васильевич, д. э. н., профессор,
Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск

КОЗЛОВ Александр Геннадьевич, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ЛИ Вэймин, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (ЛНТИ), Бэньси, Китай

МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

МЭН Чжаоцзюнь, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (ЛНТИ), Бэньси, Китай

НАУМЕНКО Александр Петрович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

НОВИКОВ Алексей Алексеевич, д. т. н.,
Омский государственный технический университет, г. Омск

НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, д. т. н., профессор,
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
г. Павлодар, Республика Казахстан

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, д. т. н.,
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

ПАНЧУК Константин Леонидович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ПОЛЕЩЕНКО Константин Николаевич, д. т. н., профессор,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск

ПОЛИЩУК Владимир Иосифович, д. т. н., профессор,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

ПОПОВ Андрей Юрьевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

РАУБА Александр Александрович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

РОТКОВ Сергей Игоревич, д. т. н., профессор,
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Нижний Новгород

СУШКОВ Валерий Валентинович, д. т. н., профессор,
Нижевартовский государственный университет, г. Нижневартовск

СЫЗРАНЦЕВ Владимир Николаевич, д. т. н., профессор,
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ТОЛОК Алексей Вячеславович, д. т. н., профессор,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, к. т. н.,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ХУАН Чжидун, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (ЛНТИ), Бэньси, Китай

ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ШАЛАЙ Виктор Владимирович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ЩЕРБА Виктор Евгеньевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ЮРКОВ Виктор Юрьевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный педагогический университет, г. Омск

ЯКОВЛЕВА Елена Владимировна, д. э. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск



OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.
Published 4 times a year

№ 3 (195) 2025

FOUNDER

Federal State
Autonomous Educational Institution
of Higher Education
«Omsk State Technical University»

Federal State Budgetary
Educational Institution
of Higher Education «Omsk State
Transport University»

Identification number
of registered Mass Media
ПМ № ТУ55-00559 from 06.10.2017
issued by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology,
and Mass Media, Omsk region

Journal Website:
<https://journals.omgstu.ru>

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgstu.ru/
general_information/media.omgstu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgstu.ru/general_information/media.omgstu/journal_of_omsk_research_journal/)

Subscription Index
in Federal Agency on Press and Mass
Communications Catalog 83597

Executive Secretary
M. F. Fedorchuk

Editor
T. P. Semina

Computer Page-Proofs
O. N. Chirun

Cover Layout
V. S. Gurinov

© Editorial Board of
«Omsk Scientific Bulletin»,
OmSTU

Signed in Print 11.09.2025
Date of Publication 22.09.2025

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 14,42
Offset Paper

Printed on a Duplicator
at Scientific Publishing Office,
Omsk State Technical University

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 60
Open Price

EDITORIAL STAFF

- KROPOTIN Oleg Vitalyevich (Chief Editor)**, D. Sc. (Technical), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- OVCHARENKO Sergey Mikhaylovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- GALIEV Ilkham Islamovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- AVDEEVA Diana Konstantinovna**, D. Sc. (Technical), Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- AUSHEEV Tumen Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor, East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
- BIRYUKOV Sergey Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- BUBNOV Aleksey Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- VAVILOV Vladimir Platonovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- GORYUNOV Vladimir Nikolaevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- GRADOBOEV Alexander Vasilievich**, D. Sc. (Technical), Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- KARPOV Valeriy Vasilyevich**, D. Sc. (Economic), Professor, Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Omsk, Russia
- KOZLOV Aleksandr Gennadyevich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- KUZNETSOV Andrey Albertovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- LI Weimin**, Doctor, Professor, Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China
- MAYSTRENKO Vasily Andreevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- MENG Zhaojun**, Doctor, Professor, Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China
- NAUMENKO Alexander Petrovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- NOVIKOV Alexey Alexeevich**, D. Sc. (Technical), Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- NOVOZHILOV Aleksandr Nikolayevich**, D. Sc. (Technical), Professor, S.Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan
- OSIPOV Dmitry Sergeevich**, D. Sc. (Technical), Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia
- PANCHUK Konstantin Leonidovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- POLESHCHENKO Konstantin Nikolayevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia
- POLISHCHUK Vladimir Iosifovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
- POPOV Andrey Yuryevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- RAUBA Alexander Aleksandrovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- ROTKOV Sergey Igorevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia
- SUSHKOV Valery Valentinovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia
- SYZRANTSEV Vladimir Nikolaevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
- TATEVOSYAN Andrey Alexandrovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- TOLOK Aleksey Vyacheslavovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
- FEDOROV Alexey Arkadievich**, Cand. Sc. (Technical), Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- KHARLAMOV Victor Vasilievich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- HUANG Zhidong**, Doctor, Professor, Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China
- CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- SHALAY Viktor Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- SCHERBA Victor Evgenievich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- YURKOV Viktor Yuryevich**, D. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia
- YAKOVLEVA Elena Vladimirovna**, D. Sc. (Economic), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ф. Н. Притыкин, Д. Б. Фёдоров. Анализ мгновенных состояний выходного звена механизма антропоморфного робота с использованием методов геометрического моделирования	5
В. Ю. Юрков, М. А. Чижик. Параметризация геометрической формы многомерных конечных нерегулярных точечных множеств	13
Е. К. Савич. Цифровой инструментарий управления качеством на этапах жизненного цикла продукции	19
К. А. Бражникова, Е. К. Савич. Оценка качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ	27

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. И. Антонов, Д. Ю. Руди. Имитационное моделирование нелинейных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ	34
Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова. Исследование влияния тяговой сети железных дорог переменного тока на смежные устройства с помощью имитационного моделирования	44
О. В. Косарева-Володько, Алилу Сани Маман Кабиру, Е. Н. Шафоростова. Экономическая оценка фотоэлектрической системы, подключенной к электрической сети при использовании программного обеспечения PVSystem	51
В. В. Миханович, А. Ф. Бурков, А. Ю. Филоженко. Применение мощных многофазных электрических машин в судовых гребных электроустановках	60
О. А. Юшкова, И. Р. Гарипов, И. Ф. Саяхов. Перспективы применения 3D-печатных криорезистивных обмоток для электрических машин	66
А. М. Дайнович. Сравнительный анализ способов демодуляции сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией	73
Б. Р. Саидмуродов, С. Е. Кокин. Модели оперативного прогнозирования энергопотребления дуговых сталеплавильных печей с использованием методов машинного обучения	79
А. Ю. Турыбрин, А. В. Бубнов, А. Н. Четверик. Усовершенствование конструкции электропривода лазерных сканеров на основе анализа особенностей применения сканирующих устройств в строительной отрасли	85
Е. В. Егоров, Д. Д. Боровых. Применение оперативно-измерительного комплекса для контроля режимов работы асинхронного электродвигателя в электротехнической системе	95

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

С. В. Бирюков. Трехкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа	103
Л. Р. Григорьян, Н. М. Богатов, Р. Л. Григорьян. Методы и аппаратура метрологической аттестации фазоизмерительной техники	111
Г. М. Сидельников. Помехоустойчивость демодулятора сигнала с бинарной фазовой модуляцией при адаптивном изменении конфигурации границ принятия решения в канале с многолучевостью	118

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

- F. N. Pritykin, D. B. Fedorov.** Analysis of instantaneous states of the output link of anthropomorphic robot mechanism using geometric modeling methods 5
- V. Yu. Yurkov, M. A. Chizhik.** Geometric shape parameterization of multidimensional finite non-regular point sets 13
- E. K. Savich.** Digital quality management toolkit at product lifecycle stages 19
- K. A. Brazhnikova, E. K. Savich.** Assessment of the quality of the research process at the stage of scientific studies 27

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

- A. I. Antonov, D. Yu. Rudi.** Simulation modelling of nonlinear modes of electric network operation and processing of results using a computer program 34
- T. V. Kovaleva, O. O. Komyakova, N. V. Pashkova.** Study of the influence of AC railway traction network on adjacent devices using simulation modeling 44
- O. V. Kosareva-Volodko, Alilu Sani Maman Kabiru, E. N. Shaforostova.** Economic evaluation of a grid-connected photovoltaic system using PVsystem software 51
- V. V. Mikhanoshin, A. F. Burkov, A. Yu. Filozhenko.** Application of powerful multiphase electric machines in marine rowing electric installations 60
- O. A. Yushkova, I. R. Garipov, I. F. Sayakhov.** Prospects for application of 3D-printing cryoresistant windings for electric machines 66
- A. M. Daynovich.** Comparative analysis of signal demodulation methods in phase-lock motor drive 73
- B. R. Saidmurodov, S. E. Kokin.** Models for operational forecasting of energy consumption in electric arc furnaces using machine learning methods 79
- A. Yu. Turybrin, A. V. Bubnov, A. N. Chetverik.** Improvement of optimization of the drive design for laser scanners based on the analysis of characteristics of scanning devices in construction industry 85
- E. V. Egorov, D. D. Borovykh.** Application of an operational measuring complex for monitoring the operating mode of an asynchronous electric motor with a closed-loop rotor 95

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

- S. V. Biryukov.** Three-component spherical dual-type electric field strength sensor 103
- L. R. Grigoryan, N. M. Bogatov, R. L. Grigoryan.** Methods and equipment for metrological certification of phase-measuring equipment 111
- G. M. Sidelnikov.** Noise immunity of a binary phase modulated signal demodulator with adaptive configuration change of decision boundaries in a multipath channel 118

АНАЛИЗ МГНОВЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МЕХАНИЗМА АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ф. Н. Притыкин, Д. Б. Фёдоров

Омский государственный технический университет, г. Омск

Проведен анализ мгновенных состояний подвижной системы, связанной с выходным звеном антропоморфного робота на основе использования графических построений, выполняемых на фронтальной и горизонтальной проекциях. Выполнены построения скоростной плоскости и скоростного пучка при полученных мгновенных значениях обобщенных скоростей на примере заданного синтеза малых движений механизма антропоморфного робота. Синтез движений основан на использовании матриц частных передаточных отношений с использованием критерия минимизации квадратичного функционала объема движения. Графический анализ составляющих векторов абсолютных линейных скоростей трех точек подвижной системы позволил определить способ расчета промежуточных конфигураций руки антропоморфного робота, основанный на использовании весовых коэффициентов обобщенных скоростей. Представлены результаты расчетов тестового задания при компьютерном моделировании движения антропоморфного робота.

Ключевые слова: механизмы манипуляторов, мгновенные состояния механизмов, вектор обобщенных скоростей, графические построения скоростной плоскости, скоростной пучок, компьютерное моделирование движений антропоморфных роботов, синтез движений манипуляторов, запретные зоны.

Для цитирования: Притыкин Ф. Н., Фёдоров Д. Б. Анализ мгновенных состояний выходного звена механизма антропоморфного робота с использованием методов геометрического моделирования // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-5-12. EDN: NIKOLK.



© Притыкин Ф. Н., Фёдоров Д. Б., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF INSTANTANEOUS STATES OF THE OUTPUT LINK OF ANTHROPOMORPHIC ROBOT MECHANISM USING GEOMETRIC MODELING METHODS

F. N. Pritykin, D. B. Fedorov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The analysis of instantaneous states of the moving system connected with the output link of the anthropomorphic robot is carried out based on the use of graphical constructions performed on the frontal and horizontal projections. The constructions of the velocity plane and the velocity beam are performed for the obtained instantaneous values of generalized velocities using the example of the given synthesis of small motions of the robot mechanism. The synthesis of movements is based on the use of matrices of partial gear ratios using the criterion of minimizing the quadratic functional of the volume of movement. The graphical analysis of the components of the vectors of absolute linear velocities of three points of the moving system made it possible to determine the method for calculating intermediate configurations of the

arm of the anthropomorphic robot based on the use of weight coefficients of generalized velocities. The results of calculating the test task in computer modeling of the movement of the anthropomorphic robot are presented.

Keywords: mechanisms of manipulators, instantaneous states of mechanisms, vector of generalized velocities, graphical constructions of the velocity plane, velocity beam, computer modeling of the movements of anthropomorphic robots, synthesis of manipulator movements, restricted areas.

For citation: Pritykin F. N., Fedorov D. B. Analysis of instantaneous states of the output link of anthropomorphic robot mechanism using geometric modeling methods. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-5-12. EDN: HIKOLK.



© Pritykin F. N., Fedorov D. B., 2025.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Планирование антропоморфных движений роботизированных рук может осуществляться с использованием различных алгоритмов [1]. Чтобы обеспечить более естественные антропоморфные движения необходимо обеспечить при синтезе движений следующие условия. Во-первых, необходима избыточность движений, позволяющая достигнуть гибкость и точность. Во-вторых, необходимо разнообразие движений, которые обеспечивают уникальную способность к адаптации руки антропоморфного робота.

Заметим, что процесс создания естественных человеческих движений механизмов рук полностью не раскрыт. Проблема двигательной избыточности в антропоморфных роботах существует на уровне синтеза движений по вектору скоростей, что приводит к бесконечному числу решений обратной задачи кинематики [2, 3]. Известны подходы, позволяющие точно определить оптимальное решение, удовлетворяющее ограничениям с помощью методов математической оптимизации [4–6].

Другой подход обеспечения антропоморфных движений и решение задачи двигательной избыточности основан на сборе данных о естественных перемещениях верхних конечностей рук человека и создание на основе этого базы данных движений [7]. Такой подход позволяет преодолевать не только избыточность при планировании движения, но и обеспечивать необходимую силу захвата и прогнозировать его положение с течением времени [8].

Движения исполнительного механизма руки антропоморфного робота могут быть основаны на способности к обучению выполнению двигательных задач в изменяющихся условиях окружающей среды [9–11]. Антропоморфные траектории движений исполнительных механизмов рук, сгенерированные с помощью обучения по демонстрации, зависят от эталонной траектории. При этом каждая итерация траектории накапливает ошибки прогнозирования, что приводит к деформации движения роботизированной руки [12]. Эту проблему случайного изменения параметров модели механизма руки удалось решить благодаря объединению множества характеристик процесса движения и использованию функции вознаграждения [13].

В работе [14] предложена иерархическая система обучения на основе демонстраций, которая сочетает в себе символическое и траекторное обучение для улучшения способности механизма руки адаптироваться к новым задачам и изменениям положений запретных зон окружающей среды.

Для управления движением антропоморфных роботов могут быть использованы нейронные сети. Так, использование нейронных сетей в задачах управления механизмами рук антропоморфных роботов предложено в работе [15].

Для упрощения циклов разработки роботов, сокращения расходов и повышения общей эффективности при проектировании и внедрении робототехнических систем в различных сферах деятельности человека используют различные симуляторы движений. Известны следующие симуляторы движения NVIDIA Isaac SIM, Gazebo, RoboDK, Webots, Unity, AWS RoboMaker и другие, которые позволяют создавать фотореалистические, физически точные виртуальные среды [16, 17]. Интерфейс указанных программ позволяет пользователям без труда создавать сложные роботизированные модели. Большинство программ при этом поддерживают обширную библиотеку роботов и периферийных устройств и обеспечивают мощную функцию автономного программирования. Симуляторы движений позволяют пользователям создавать не только собственные модели роботов, но и обеспечивать их интеграцию с реальным оборудованием, где максимально отсутствует разрыв между виртуальными экспериментами и реальными физическими процессами, происходящими в практической деятельности робототехнических систем. Однако симуляторы движений не позволяют принимать различные решения, связанные с использованием двигательной избыточности для обхода запретных зон в рабочем пространстве с целью достижения заранее заданных целевых точек.

Анализ проведенных исследований связанных с планированием антропоморфных движений роботизированных рук позволяет сделать вывод об отсутствии систематического обоснования и извлечения характеристик движения исполнительных механизмов. Заметим, что наиболее наглядно характеристики движения антропоморфных роботов могут быть получены благодаря использованию методов геометрического моделирования.

Геометрическое моделирование используется при изучении многих явлений, процессов и закономерностей в различных областях науки и техники. Одним из примеров этому является использование различных абстрактных, обобщенных, геометрических моделей при анализе и решении теоретических и прикладных задач механики и робототехники. Геометрическое толкование некоторых понятий здесь имеет большое значение в преподавании данных предметов. Например, известный ученый Н. Е. Жуковский о роли геометрии в теоретической

и прикладной механике говорил следующее: «Что в кинематике первое место принадлежит геометрии, что в решении вопросов динамики геометрическое толкование играет важную роль для удачной постановки задачи и разъяснения смысла решения, найденного аналитическим путем, теперь признается всеми» [18]. Геометрическое моделирование также способствует установлению взаимосвязи между геометрическими и кинематическими параметрами, используемыми при синтезе движений манипулятора с учетом положения запретных зон.

Понятие мгновенных состояний отдельных звеньев и всего механизма является одним из основополагающих при исследовании закономерностей их движения. Известно, что мгновенные состояния звеньев механизма, совершающих пространственные движения, характеризуют положение мгновенно винтовой оси m (r_m, u_m) и параметры движения (V_m, ω_m), где r_m — радиус-вектор точки M , принадлежащей прямой m ; u_m — направляющий единичный вектор прямой m ; V_m — поступательная скорость подвижной системы (ПС) вдоль прямой m ; ω_m — мгновенный поворот вокруг этой оси [18, 19]. Мгновенные состояния звеньев зубчатых механизмов и пространственных механизмов подробно исследованы в работах [18, 20]. При этом в указанных работах был использован метод, основанный на построении скоростной плоскости и скоростного пучка на комплексном чертеже. Исследование мгновенных состояний выходного звена (ВЗ) незамкнутых механизмов роботов с использованием методов начертательной геометрии выполнено в работах [21, 22]. Однако геометрический анализ мгновенных состояний ВЗ антропоморфного робота во взаимосвязи с его синтезом движений и с использованием построений скоростной плоскости и скоростного пучка ранее в известных работах не выполнялся.

Постановка задачи исследования

Известно, что положение подвижного звена, а также его движение определяются положением и движением его трёх точек [23]. На рис. 1 представлено положение пространственного механизма антропоморфного робота AR-600E с обозначением его узловых точек $O^1(O^1_1, O^1_2), \dots, O^{12}(O^{12}_1, O^{12}_2)$ в неподвижной системе координат $O^0x^0y^0z^0$. Начальное положение механизма получено при синтезе движений руки по вектору скоростей. Кинематическая схема указанного механизма представлена на рис. 2. Количество узловых точек O^1, \dots, O^{12} определяется числом матриц преобразования, используемых при задании модели механизма руки. Матрицы преобразований задают переход систем координат, которые связаны со звеньями механизма. Заметим, что с одним звеном в общем случае могут быть связаны несколько систем координат [2]. Для определения в наглядном виде степени влияния мгновенных обобщенных скоростей механизма на абсолютные линейные скорости точек захвата определим мгновенное движение подвижной системы, связанной с ВЗ. Пусть подвижную систему ВЗ определяют точки A, B и C . При этом точка B совпадает с центром ВЗ, а точки B и C находятся на оси вращения первой кинематической пары, которую задаёт прямая a_1 (рис. 2). Оси других вращательных кинематических пар соответственно на рисунке определяют прямые a_2, a_3, a_4 и a_5 .

Построим положение скорости плоскости и скоростного пучка для подвижной системы, определяемой точками A, B и C . Заметим, что точки A

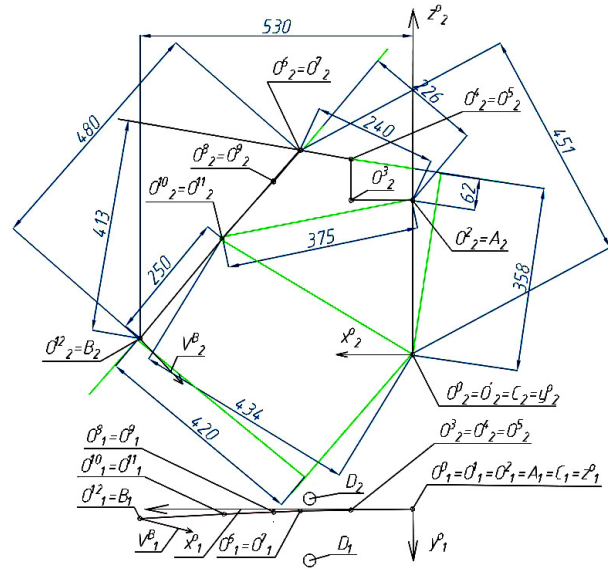


Рис. 1. Положения узловых точек расчетной конфигурации антропоморфного робота
 Fig. 1. Positions of the nodal points of the calculated configuration of the anthropomorphic robot

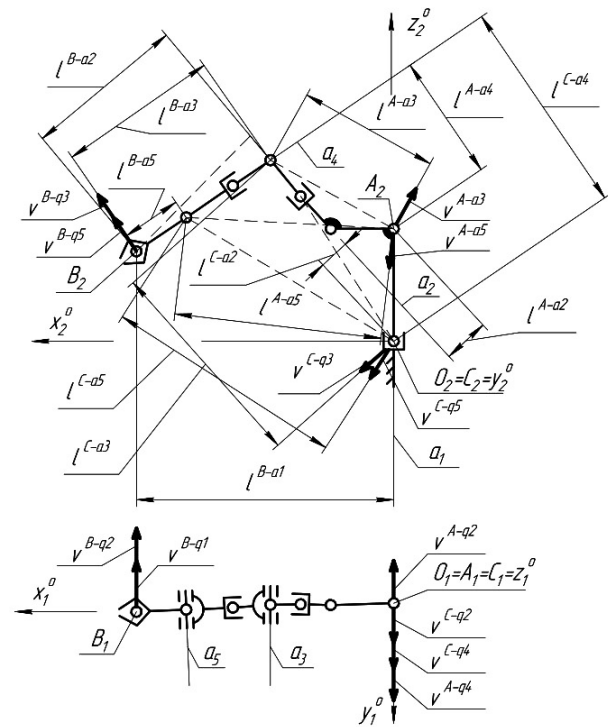


Рис. 2. Кинематическая схема антропоморфного робота и проекции составляющих векторов точек A, B и C при мгновенных поворотах вокруг осей вращения a_1, a_2, \dots, a_5
 Fig. 2. Kinematic diagram of the anthropomorphic robot and projections of the component vectors of points A, B and C during instantaneous rotations around the rotation axes a_1, a_2, \dots, a_5

и C не принадлежат звену механизма, заданному отрезком прямой O^1O^2 находящемуся между узловыми точками O^1 и O^2 и, следовательно, жестко не связаны с этим звеном. При положении точек A и C (принадлежащих подвижной системе, связанной с ВЗ) в указанных точках упрощается нахождение их абсолютных линейных скоростей,

Таблица 1. Принятые обозначения геометрических и кинематических параметров антропоморфного робота

Table 1. Accepted designations of geometric and kinematic parameters of an anthropomorphic robot

№	Обозначения	Названия
1	a_1, a_2, \dots, a_5	Оси вращений в кинематических парах
2	$V^{A-q_2}, V^{A-q_3}, \dots, V^{B-q_1}, V^{B-q_2}, \dots, V^{C-q_2}, V^{C-q_3}, \dots$	Вектора линейных скоростей точек A, B и C при их вращениях вокруг осей a_1, a_2, \dots и т.п. ($\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots$ — мгновенные угловые скорости или мгновенные скорости изменения обобщённых координат)
3	$A^{q_2}(A^{q_2}_1, A^{q_2}_2), A^{q_3}(A^{q_3}_1, A^{q_3}_2), \dots, B^{q_1}(B^{q_1}_1, B^{q_1}_2), B^{q_2}(B^{q_2}_1, B^{q_2}_2), \dots$	Конечные точки (проекции конечных точек) составляющих векторов $V^{A-q_2}, V^{A-q_3}, \dots, V^{B-q_1}, V^{B-q_2}, \dots$
4	$I^{A-a_2}, I^{A-a_3}, \dots, I^{B-a_1}, I^{B-a_2}, \dots, I^{C-a_2}, I^{C-a_3}, \dots$	Расстояния точек A, B и C до осей вращения a_1, a_2, \dots (мгновенные передаточные отношения)

Таблица 2. Значения модулей составляющих линейных скоростей точек A, B и C при их вращении вокруг осей $a_1 \dots a_5$

Table 2. Values of the modules of the components of the linear velocities of points A, B and C during their rotation around the axes $a_1 \dots a_5$

Обозначение точек ПС	Значения мгновенных обобщённых скоростей \dot{q}_i (град/с)				
	$\dot{q}_1 = -5$	$\dot{q}_2 = 4,4$	$\dot{q}_3 = -1,58$	$\dot{q}_4 = -0,05$	$\dot{q}_5 = 5,94$
	Значения модулей скоростей (мм/с)				
A	—	$V^{A-q_2} = 2,72$	$V^{A-q_3} = 3,79$	$V^{A-q_4} = 0,11$	$V^{A-q_5} = 22,27$
B	$V^{B-q_1} = 26,4$	$V^{B-q_2} = 18,17$	$V^{B-q_3} = 7,58$	—	$V^{B-q_5} = 14,85$
C	—	$V^{C-q_2} = 15,97$	$V^{C-q_3} = 3,57$	$V^{C-q_4} = 0,21$	$V^{C-q_5} = 25,8$

а следовательно, и упрощается построение скоростной плоскости. Пример нахождения векторов абсолютных линейных скоростей точек A, B и C проведем, когда значения обобщённых координат q_1, q_2 и q_4 будут близкими к нулю. В этом случае узловые точки механизма руки $O^3, O^{4-5}, O^{6-7}, O^8$ и O^{9-10} будут с некоторым допущением принадлежать фронтальной плоскости проекции (рис. 1, 2).

При проведении исследований примем обозначения геометрических и кинематических параметров в соответствии с табл. 1. На рис. 1 программой синтеза движений построена первая конфигурация руки, при этом начальные значения обобщённых координат были приняты равными $q_1 = 0,5^\circ; q_2 = 0,5^\circ; q_3 = -60^\circ; q_4 = 0,5^\circ$ и $q_5 = 0,5^\circ$. Для данной конфигурации и первой итерации синтеза движений были определены мгновенные обобщённые скорости \dot{q}_i или приращения обобщённых координат Δq_i (при этом принято допущение $\dot{q}_i \approx \Delta q_i$). Вектор обобщённых скоростей $Q(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_5)$ определяют линейной системой уравнений, определяющей взаимосвязь скоростей ВЗ и обобщённых скоростей \dot{q}_i [3, 4]. Для преодоления двигательной избыточности использован известный критерий минимизации объема движения [4]. При этом получены значения мгновенных обобщённых скоростей $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_5$, которые представлены в табл. 2. Целевую точку при синтезе движений руки задают горизонтальная и фронтальная проекции точек D_1 и D_2 (рис. 1). Определим графическим методом влияние обобщённых скоростей \dot{q}_i на линейные абсолютные скорости точек A, B и C подвижной системы, связанной с ВЗ.

Геометрический анализ построений скоростной плоскости и скоростного пучка

Проведем анализ построений векторов мгновенных линейных скоростей трех точек подвижной

системы, жестко связанной с ВЗ при полученных значениях обобщённых скоростей \dot{q}_i (табл. 2). Для этого определим составляющие векторы абсолютных линейных скоростей точек A, B и C . Составляющие компоненты модулей указанных векторов для линейной скорости точки A определяют по следующим зависимостям:

$$V^{A-q_2} = I^{A-a_2} \cdot \dot{q}_2; V^{A-q_3} = I^{A-a_3} \cdot \dot{q}_3;$$

$$V^{A-q_4} = I^{A-a_4} \cdot \dot{q}_4; V^{A-q_5} = I^{A-a_5} \cdot \dot{q}_5. \quad (1)$$

Геометрический смысл мгновенных передаточных отношений $I^{A-a_2}, \dots, I^{A-a_5}$ при мгновенных поворотах точки A вокруг осей a_2, \dots, a_5 вращательных кинематических пар с обобщёнными скоростями $\dot{q}_2, \dots, \dot{q}_5$ представлен на рис. 2. Значения указанных параметров для первой конфигурации руки $I^{A-a_2}, \dots, I^{A-a_5}$ представлены на рис. 1.

Аналогичным образом определяются составляющие компоненты модулей векторов линейных скоростей $V^{B-q_1}, \dots, V^{B-q_5}$ и $V^{C-q_2}, \dots, V^{C-q_5}$ точек B и C . Расчётные значения указанных параметров сведены в табл. 2. На рис. 3 на главном виде и виде сверху в системе координат $O^V x^V y^V z^V$ (не имеющей проекционной взаимосвязи с системой $O^0 x^0 y^0 z^0$) построены проекции составляющих векторов $V^{A-q_2}(V^{A-q_2}_1, V^{A-q_2}_2), \dots, V^{A-q_5}(V^{A-q_5}_1, V^{A-q_5}_2), V^{B-q_1}(V^{B-q_1}_1, V^{B-q_1}_2), \dots, V^{B-q_5}(V^{B-q_5}_1, V^{B-q_5}_2)$ и $V^{C-q_2}(V^{C-q_2}_1, V^{C-q_2}_2), \dots, V^{C-q_5}(V^{C-q_5}_1, V^{C-q_5}_2)$. Вид спереди и вид сверху, где изображены данные вектора, определяют проекциями осей системы координат $O^V_2 x^V_2, O^V_2 z^V_2, O^V_1 x^V_1$ и $O^V_1 y^V_1$, в которой строятся скоростной пучок и скоростная плоскость. При этом в качестве центра пучка скоростей принята точка $O^V(O^V_1, O^V_2)$. Заметим, что в табл. 2 в некоторых ячейках отсутствует информация. Это объясняется тем, что точки A и C находятся на оси вращения a_1 , а точка B , соответствен-

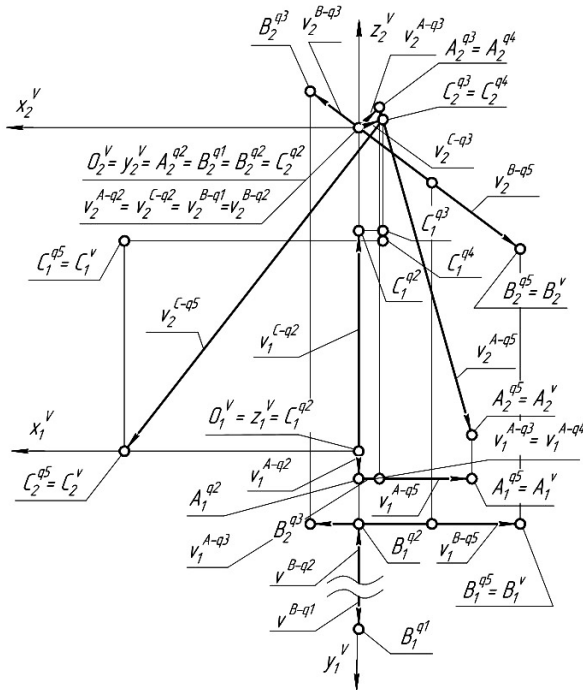


Рис. 3. Определение абсолютных линейных скоростей точек A , B и C подвижной системы, связанной с выходным звеном, задающих положение скоростной плоскости
 Fig. 3. Determination of absolute linear velocities of points A , B and C of the moving system connected to the output link specifying the position of the velocity plane

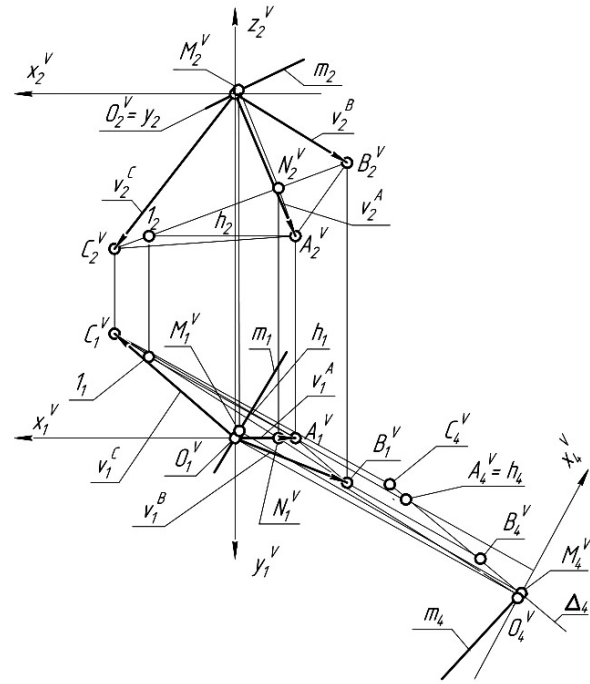


Рис. 4. Построение мгновенно-винтовой оси, характеризующей движение подвижной системы, связанной с выходным звеном
 Fig. 4. Construction of an instantaneous screw axis characterizing the motion of a moving system connected to an output link

но, находится на оси вращения a_4 . Для определения вектора абсолютной скорости точки A построим вначале горизонтальную проекцию вектора \mathbf{V}^{A-q2}_1 и найдём конечную точку A^{q2}_1 этого вектора (рис. 3). Указанный вектор отложим в соответствии с его направлением и модулем в заданном масштабе (табл. 2). При этом горизонтальная проекция этого вектора будет представлена отрезком $O^V_1 A^{q2}_1$. На главном виде данный вектор проецируется в точку, которая совпадает с точкой $O^V_2 = A^{q2}_2$.

Далее от конечной точки A^{q2}_1, A^{q2}_2 вектора \mathbf{V}^{A-q2}_1 на фронтальной проекции отложим вектор \mathbf{V}^{A-q3}_2 в соответствии с заданным направлением и модулем. Направление этого вектора определяется исходя из положения отрезка $O^V_2 O^V_6$ и знака обобщённой скорости q_3 (рис. 1, рис. 2). Фронтальную и горизонтальную проекции конечной точки вектора $\mathbf{V}^{A-q3}_2 (V^{A-q3}_1, V^{A-q3}_2)$ задают точки A^{q3}_2 и A^{q3}_1 . Данный вектор на фронтальной проекции представлен отрезком $A^{q2}_2 A^{q3}_2$, который проецируется в натуральную величину. Аналогичным образом строят векторы $\mathbf{V}^{A-q4}_1 (V^{A-q4}_1, V^{A-q4}_2)$ и $\mathbf{V}^{A-q5}_1 (V^{A-q5}_1, V^{A-q5}_2)$. Так как модуль вектора скорости \mathbf{V}^{A-q4}_1 равен сравнительно малой величине 0,11 мм/с, то фронтальные и горизонтальные проекции конечной точки этого вектора совпадают с точками $A^{q4}_2 \approx A^{q3}_2$ и $A^{q4}_1 \approx A^{q3}_1$. Конечная точка $A^{q5}_1 (A^{q5}_1, A^{q5}_2)$ вектора $\mathbf{V}^{A-q5}_1 (V^{A-q5}_1, V^{A-q5}_2)$ определяет суммарный вектор \mathbf{V}^A при сложении составляющих векторов $\mathbf{V}^{A-q2}_1, \mathbf{V}^{A-q3}_2, \mathbf{V}^{A-q4}_1$ и \mathbf{V}^{A-q5}_1 . Учитывая громоздкость различных построений, выполняемых на рис. 3, проекции суммарного вектора \mathbf{V}^A на рис. 3 не изображены.

По аналогичной методике находят суммарные векторы \mathbf{V}^B и \mathbf{V}^C соответственно составляющих векторов $\mathbf{V}^{B-q1}_1 (V^{B-q1}_1, V^{B-q1}_2), \mathbf{V}^{B-q2}_1 (V^{B-q2}_1, V^{B-q2}_2), \mathbf{V}^{B-q3}_1 (V^{B-q3}_1, V^{B-q3}_2), \mathbf{V}^{B-q5}_1 (V^{B-q5}_1, V^{B-q5}_2)$ и векторов $\mathbf{V}^{C-q2}_1 (V^{C-q2}_1, V^{C-q2}_2), \mathbf{V}^{C-q3}_1 (V^{C-q3}_1, V^{C-q3}_2), \mathbf{V}^{C-q4}_1 (V^{C-q4}_1, V^{C-q4}_2), \mathbf{V}^{C-q5}_1 (V^{C-q5}_1, V^{C-q5}_2)$. Проекция составляющих векторов и их конечные

точки $B^{q2}_1, B^{q2}_2, \dots, B^{q5}_1, B^{q5}_2, C^{q2}_1, C^{q2}_2, \dots, C^{q5}_1, C^{q5}_2$ построены на рис. 3. При этом проекции точек $B^{q5}_1, B^{q5}_2, C^{q5}_1, C^{q5}_2$ задают проекции конечных точек абсолютных (суммарных) векторов линейных скоростей \mathbf{V}^B и \mathbf{V}^C точек B и C , принадлежащих подвижной системе, связанной с выходным звеном. Проекция абсолютных векторов \mathbf{V}^B и \mathbf{V}^C с целью упрощения рис. 3 также не показаны.

На рис. 4 на главном виде и виде сверху построены положения точек $A^V (A^V_1, A^V_2), B^V (B^V_1, B^V_2)$ и $C^V (C^V_1, C^V_2)$, которые ранее были определены на рис. 3. Для обеспечения более удачной компоновки на рис. 4 увеличено расстояние между главным видом и видом сверху. На рис. 4 отрезки $O^V_2 A^V_2, O^V_2 B^V_2, O^V_2 C^V_2$ и $O^V_1 A^V_1, O^V_1 B^V_1, O^V_1 C^V_1$ соответственно представляют фронтальные и горизонтальные проекции абсолютных векторов скоростей $\mathbf{V}^A (V^A_1, V^A_2), \mathbf{V}^B (V^B_1, V^B_2), \mathbf{V}^C (V^C_1, V^C_2)$ точек A, B и C . Указанные векторы скоростей определяют скоростной пучок, а проекции отрезков $A^V_2 B^V_2, B^V_2 C^V_2, C^V_2 A^V_2$ и $A^V_1 B^V_1, B^V_1 C^V_1, C^V_1 A^V_1$ определяют соответственно фронтальную и горизонтальную проекции скоростной плоскости $A^V B^V C^V$. Спроецируем скоростную плоскость в линию. Для этого в плоскости треугольника $A^V B^V C^V$ построим горизонталь $h (h_1, h_2)$ (проходящую через точку A^V) и спроецируем её на плоскости проекций Π_4 в точку, которая будет совпадать с точкой $A^V_4 = h_4$. Скоростная плоскость $A^V B^V C^V$ на плоскости проекций Π_4 проецируется в линию, которую обозначим Δ_4 . Данная линия Δ_4 определяет вырожденную проекцию скоростной плоскости. Опустим перпендикуляр из центра пучка скоростей O^V_4 на скоростную плоскость Δ_4 . Данный перпендикуляр на рис. 4 обозначен m_4 . Проекция m_1, m_2 и m_4 этого перпендикуляра определяют положение мгновенно-винтовой оси m в системе $O^V x^V y^V z^V$. Проекция M^V_1, M^V_2 определяют точку пересечения прямой m со скоростной плоскостью Δ . Тогда отрезок $O^V_4 M^V_4$

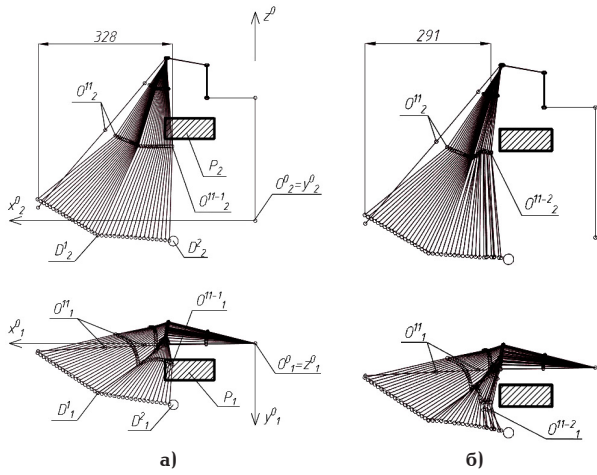
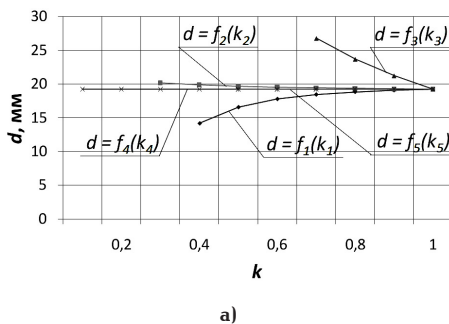


Рис. 5. Построение движений механизма руки антропоморфного робота:
а — при значениях $k_i^V = 0$;
б — при значениях $k_s^V = 0,4$
Fig. 5. Construction of the movements of the arm mechanism of an anthropomorphic robot:
a — for values of $k_i^V = 0$;
б — for values of $k_s^V = 0,4$

определяет мгновенную поступательную скорость V_m вдоль оси мгновенного винта. Исходя из отношения отрезков $C^V N^V / C^V B^V = CN / CB$, и $M^V N^V / M^V A^V = MN / MA$ на скоростной плоскости и в плоскости треугольника ABC в системах $O^V x^V y^V z^V$ и $O^0 x^0 y^0 z^0$, можно определить положение мгновенно-винтовой оси в подвижной системе, характеризующей мгновенное движение ВЗ. Точка N^V определяется пересечением отрезков $C^V B^V$ и $M^V A^V$ (рис. 4).

Рассмотрим синтез движений руки антропоморфного робота по заданному вектору скоростей ВЗ $\mathbf{V}^B(V_1^B, V_2^B)$ при наличии запретной зоны $P(P_1, P_2)$ (рис. 5а). Так как по направлению движения механизма руки находится запретная зона P , то необходимо в направлении этой зоны уменьшить скорость узловой точки $O^{11}(O^{11}_1, O^{11}_2)$. Найдём точку пересечения прямых $O^{12}_2 O^{11}_1$ и $O^{12}_2 O^{11}_2$. Данная точка на рис. 1 обозначена точкой K_2 . По отношению отрезков $K_2 C_2 / K_2 A_2 = K_2^V C_2^V / K_2^V A_2^V$ возможно определение точки K_2^V на скоростной плоскости, определяющей абсолютную линейную скорость точки K подвижной системы, связанной с ВЗ (рис. 4).



Используя отношения отрезков $B_2 O^{11}_2 / B_2 K_2 = B_2^V O^{11(V)}_2 / B_2^V K_2^V$ возможно определение точки $O^{11(V)}$ на скоростной плоскости. Точка $O^{11(V)}$ будет определять абсолютную скорость точки O^{11} , которая принадлежит ВЗ. Анализ построений на рис. 3 и рис. 4 показывает, что для уменьшения модуля вектора скорости $\mathbf{V}^{O^{11}}$ узловой точки, принадлежащей ВЗ механизма, необходимо изменить модули составляющих векторов скоростей точек A и C . Изменение положений точек A^V и C^V при синтезе перемещений по критерию минимизации объёма движения возможно благодаря использованию весовых коэффициентов k_i^V . При синтезе движений используют линейную систему уравнений [3, 4]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{J} \mathbf{A} \mathbf{Q}, \quad (2)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \dots & J_{15} \\ J_{21} & J_{22} & \dots & J_{25} \\ J_{31} & J_{32} & \dots & J_{35} \\ J_{41} & J_{42} & \dots & J_{45} \\ J_{51} & J_{52} & \dots & J_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^V & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2^V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3^V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4^V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_5^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $V(V_x, V_y, V_z)$ — вектор линейной скорости центра ВЗ; \mathbf{J} — матрица частных передаточных отношений (коэффициенты $J_{41}, \dots, J_{45}, J_{51}, \dots, J_{55}$ вычисляются в соответствии с критерием минимизации квадратичного функционала объёма движения) [4]; \mathbf{A} — матрица значений весовых коэффициентов k_1^V, \dots, k_5^V диагонального вида, которая позволяет изменять вклад каждой из обобщённых скоростей, обеспечивающих движение центра ВЗ точки B с заданным вектором $\mathbf{V} = \mathbf{V}^B$; $\mathbf{Q}(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_5)$ — вектор обобщённых скоростей.

Результаты экспериментов

Анализ построений скоростной плоскости показывает, что на абсолютные скорости точек A , B и C влияют обобщённые скорости \dot{q}_i . Скорости данных точек могут быть изменены благодаря использованию весовых коэффициентов k_i^V (3). На рис. 5а представлено движение руки антропоморфного робота при значениях весовых коэффициентов k_i^V равных единице. Для моделирования движения

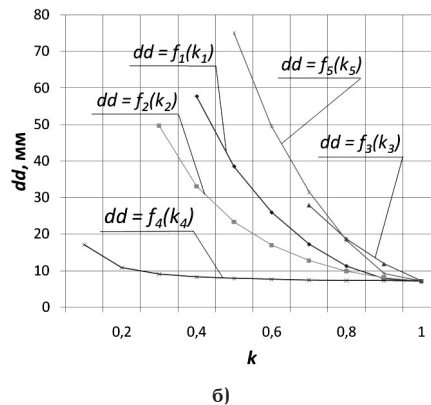


Рис. 6. Графики зависимостей: **а** — величины смещения узловой точки O^{11} в направлении запретной зоны от значений весовых коэффициентов обобщённых скоростей; **б** — точности позиционирования от значения весовых коэффициентов обобщённых скоростей
Fig. 6. Dependency graphs: **a** — the values of the displacement of the nodal point O^{11} in the direction of the forbidden zone from the values of the weighting coefficients of generalized velocities; **б** — positioning accuracy from the value of the weighting coefficients of generalized velocities

антропоморфного робота использовались программы на языке AutoLISP в среде NanoCAD. Вначале осуществляется синтез движений до первой целевой точки $D^1(D^1_1, D^1_2)$. После достижения указанной точки строится движение до второй целевой точки $D^2(D^2_1, D^2_2)$.

С целью корректировки движения, при котором замедляется движение узловой точки O^{11} в направлении к запретной зоне P проведены исследования влияния значений коэффициентов k^V_i на синтез движений. Для определения наиболее оптимального весового коэффициента k^V_i значений обобщенных скоростей (3) для корректировки движения определены графики зависимостей изменения смещения узловой точки O^{11} в направлении запретной зоны $P - d = f_i(k^V_i)$ (рис. 6а). Анализ графиков функций данного рисунка показывает наибольшее уменьшение расстояния d при использовании весового коэффициента k^V_i . Для определения минимально допустимых значений весовых коэффициентов обобщенных скоростей k^V_i при построении движений построены графики зависимостей изменения погрешностей реализаций, определяемых параметром dd от значений весовых коэффициентов k^V_i . На рис. 6б представлены указанные графики-функций $dd = f_i(k^V_i)$. Значение параметра dd определяются по зависимости:

$$dd = ((x^{TC} - m_x)^2 + (y^{TC} - m_y)^2 + (z^{TC} - m_z)^2)^{1/2}, \quad (4)$$

где x^{TC} , y^{TC} , z^{TC} — координаты следующей целевой точки на заданной траектории движения центра ВЗ; $m^{o,n}_x, m^{o,n}_y, m^{o,n}_z$ — элементы матрицы $M_{o,n}$, определяющей положение ВЗ после реализации значений вектора обобщенных скоростей (вектора приращений обобщенных координат, при этом принято допущение $\Delta q_i \approx \dot{q}_i$). Анализ графиков функций на рис. 6б, показывает, что при заданной точности позиционирования равной 20 мм максимальное значение параметра k^V_1 может быть принято 0,7. На рис. 5б синтез движений выполнен при значении коэффициента $k^V_1 = 0,7$.

При значениях k^V_1 меньше 0,7 система не может вычислить следующую конфигурацию. Так как для первой конфигурации значения некоторых обобщенных координат приняты близкими к нулевым, то механизм руки занимает особое положение [3, 4]. Это объясняет на рис. 5а скачок обобщенных координат и существенное отклонение от заданной траектории центра ВЗ при расчете второй конфигурации. В таких положениях при заданном векторе V при решении системы уравнений (2) возникают большие погрешности реализации. Как видно из рис. 5б, при построении движения с использованием весового коэффициента k^V_1 происходит уменьшение скорости узловой точки O^{11} в направлении запретной зоны P . Так, смещение узловой точки O^{11} в направлении запретной зоны в первом случае составляет 328 мм, а во втором — 291 мм. Использование весового коэффициента k^V_1 позволило достичь центром ВЗ заданной целевой точки.

В тестовом задании запретную зону задает прямоугольный параллелепипед. При задании более сложной формы запретных зон, состоящих из нескольких трехмерных примитивов, значительно увеличивается время определения пересечения механизма руки с запретной зоной. При этом требуется дополнительный расчет направления прямой, задающей кратчайшее расстояние от наиболее близкой узловой точки механизма манипулятора

до запретной зоны. В связи с этим данные запретные зоны в работе не рассматривались.

Основные результаты и выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Анализ построений скоростной плоскости и скоростного пучка на фронтальной и горизонтальной проекциях позволил определить положение мгновенно-винтовой оси и точку M подвижной системы, связанной с ВЗ, у которой абсолютная линейная скорость принимает минимальное значение при заданных мгновенных скоростях изменения обобщенных координат. Анализ построений скоростного пучка показывает, что для уменьшения модуля вектора линейной скорости узловой точки O^{11} (принадлежащей ВЗ) в направлении запретной зоны P необходимо изменить составляющие компоненты линейных скоростей, при которых положения точек A^V и C^V скоростной плоскости займут другие положения. Это может быть достигнуто благодаря использованию весовых коэффициентов обобщенных скоростей.

Проведенные исследования могут быть использованы при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке интеллектуальных систем управления, автономно функционирующих антропоморфных роботов в организованных средах, а также в учебном процессе студентов при изучении закономерностей движения робототехнических систем.

Список источников / References

- Zheng X., Han Y., Liang J. Anthropomorphic motion planning for multi-degree-of-freedom arms. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024. P. 1–16. DOI: 10.3389/fbioe.2024.1388609.
- Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с. EDN: RVBBIB.
- Pritykin F. N. Virtual'noye modelirovaniye dvizheniy robotov, imeyushchikh razlichnyuyu strukturu kinematicheskikh tsepey [Virtual simulation of robot movements with different kinematic chain structures]. Omsk, 2014. 172 p. EDN: RVBBIB. (In Russ.).
- Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Манипуляционные системы роботов. Москва: Машиностроение, 1989. 472 с. ISBN 5-217-00461-4.
- Korenyasev A. I., Salamandra B. L., Tyves L. I. Manipulyatsionnyye sistemy robotov [Robot manipulation systems]. Moscow, 1989. 472 p. ISBN 5-217-00461-4. (In Russ.).
- Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы роботов. Москва: Наука, 1985. 343 с.
- Kobrinskiy A. A., Kobrinskiy A. E. Manipulyatsionnyye sistemy robotov [Robot manipulation systems]. Moscow, 1985. 343 p. (In Russ.).
- Kim H., Li Z., Milutinovic D., Rosen J. [et al.]. Resolving the redundancy of a seven dof wearable robotic system based on kinematic and dynamic constraint. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2012. P. 305–310. DOI: 10.1109/icra.2012.6224830.
- Zacharias F., Schlette C., Schmidt F. [et al.]. Making planned paths look more human-like in humanoid robot manipulation planning. *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2011. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979553.
- Yamane K. Kinematic redundancy resolution for humanoid robots by humanmotion database. *IEEE Robotics Automation Lett*. 2020. Vol. 5 (4). P. 6948–6955. DOI: 10.1109/lra.2020.3026972.
- Kim S., Kim C., Park J. H. Human-like arm motion generation for humanoid robots using motion capture database. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots*

and Systems. 2006. P. 3486–3491. DOI: 10.1109/iros.2006.282591.

9. Huang Zhang H. T., Yang C., Chen C. L. P. Motor learning and generalization using broad learning adaptive neural control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67 (10). P. 8608–8617. DOI: 10.1109/tie.2019.2950853.

10. Nagahama K., Demura S., Yamazaki K. Robot learning of tool manipulation based on visual teaching with mitate expression. *Advanced Robotics*. 2021. Vol. 35 (12). P. 741–755. DOI: 10.1080/01691864.2021.1914724.

11. Deng M., Li Z., Kang Y. [et al.]. A learning-based hierarchical control scheme for an exoskeleton robot in human–robot cooperative manipulation. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2020. Vol. 50 (1). P. 112–125. DOI: 10.1109/tcyb.2018.2864784.

12. Sasagawa A., Sakaino S., Tsuji T. Motion generation using bilateral control-based imitation learning with autoregressive learning. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 20508–20520. DOI: 10.1109/access.2021.3054960.

13. Yang A., Chen Y., Naeem W., Fei M. Humanoid motion planning of robotic arm based on human arm action feature and reinforcement learning. *Mechatronics*. 2021. Vol. 78. 102630. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2021.102630.

14. Qian K., Liu H., Valls Miro J. [et al.]. Hierarchical and parameterized learning of pick-and-place manipulation from under-specified human demonstrations. *Advanced Robotics*. 2020. Vol. 34 (13). P. 858–872. DOI: 10.1080/01691864.2020.1778523.

15. Lu Z., Wang N., Li Q., Yang C. A trajectory and force dual-incremental robot skill learning and generalization framework using improved dynamical movement primitives and adaptive neural network control. 2023. *Neurocomputing*. Vol. 521 (5). P. 146–159. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.11.076.

16. Лучшие симуляторы роботов. URL: <https://formant.io/blog/best-robot-simulators/> (дата обращения: 14.02.2025).

Luchshiye simulyatory robotov [Best robot simulators]. URL: <https://formant.io/blog/best-robot-simulators/> (accessed: 14.02.2025). (In Russ.).

17. Сиразетдинов Р. Т., Деваев В. М., Камалов А. Р., Кацевман Е. М. Программный комплекс моделирования и виртуализации антропоморфного робота AR-601 на основе систем ROS И GAZEBO // Имитационное моделирование. Теория и практика: тр. Седьмой всерос. науч.-практ. конф. В 2 т. Москва, 2015. Т. 2. С. 328–331.

Sirazetdinov R. T., Devayev V. M., Kamalov A. R., Katsevan E. M. Programmyu kompleks modelirovaniya i virtualizatsii antropomorfnoogo robota AR-601 na osnove sistem ROS I GAZEBO [Software package for modeling and virtualization of the AR-601 anthropomorphic robot based on the ROS and GAZEBO systems]. *Imitatsionnoye Modelirovaniye. Teoriya i Praktika*. In 2 vols. Moscow, 2015. Vol. 2. P. 328–331. (In Russ.).

18. Артоболевский И. И. Теория пространственных механизмов. Москва; Ленинград; ОНТИ, 1937. 236 с.

Artobolevskiy I. I. Teoriya prostranstvennykh mekhanizmov [Theory of spatial mechanisms]. Moscow; Leningrad, 1937. 236 p. (In Russ.).

19. Диментберг Ф. М. Теория винтов и ее приложения. Москва: Наука, 1978. 328 с.

Dimentberg F. M. Teoriya vintov i eye prilozheniya [Theory of screws and its applications]. Moscow, 1978. 328 p. (In Russ.).

20. Мерцалов Н. И. Теория пространственных механизмов. Москва: Машгиз, 1951. 206 с.

Mertsalov N. I. Teoriya prostranstvennykh mekhanizmov [Theory of spatial mechanisms]. Moscow, 1951. 206 p. (In Russ.).

21. Тевлин А. М., Притыкин Ф. Н. Геометрический метод определения мгновенной винтовой оси при сложении трех винтовых движений // Современные проблемы динамики машин и их синтез. Москва: Изд-во МАИ, 1986. С. 4–8.

Tevlin A. M., Pritykin F. N. Geometricheskii metod opredeleniya mgnovennoy vintovoy osi pri slozhenii trekh vintovykh dvizheniy [Geometric method for determining the instantaneous screw axis by adding three screw motions].

Sovremennyye problemy dinamiki mashin i ikh sintez. *Modern Problems of Machine Dynamics and Their Synthesis*. Moscow, 1986. P. 4–8. (In Russ.).

22. Притыкин Ф. Н., Кайбышев А. В. Анализ мгновенных состояний выходного звена шестизвального пространственного манипулятора с помощью построения скоростной плоскости на комплексном чертеже // Приложение к журналу «Омский научный вестник». Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. С. 36–44.

Pritykin F. N., Kaybyshev A. V. Analiz mgnovennykh sostoyaniy vykhodnogo звена shestizvalnogo prostranstvennogo manipulyatora s pomoshch'yu postroyeniya skorostnoy ploskosti na kompleksnom chertezhe [Analysis of instantaneous states of the output link of a six-link spatial manipulator by the construction of a velocity plane on a complex drawing]. *Prilozheniye k zhurnalu «Omskiy nauchnyy vestnik»*. Omsk Scientific Bulletin Supplement. Omsk, 1998. P. 36–44. (In Russ.).

23. Афонин В. Л., Макушкин В. А. Интеллектуальные робототехнические системы. Москва: Интернет-университет информационных технологий, 2005. 208 с. ISBN 5-9556-0024-8. EDN: SUIEOF.

Afonin V. L., Makushkin V. A. Intellektual'nyye robototekhnicheskiye sistemy [Intelligent robotic systems]. Moscow, 2005. 208 p. ISBN 5-9556-0024-8. EDN: SUIEOF. (In Russ.).

ПРИТЫКИН Федор Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

ФЁДОРОВ Даян Борисович, преподаватель кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5003-3315

Адрес для переписки: dfiodorov55@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

PRITYKIN Fedor Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Correspondence address: pritykin@mail.ru

FEDOROV Dayan Borisovich, Lecturer of the Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5003-3315

Correspondence address: dfiodorov55@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 21.03.2025; approved after reviewing 05.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МНОГОМЕРНЫХ КОНЕЧНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ТОЧЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ

В. Ю. Юрков, М. А. Чижик

Омский государственный технический университет, г. Омск

Демонстрируется формальный подход к описанию геометрической формы точечных нерегулярных множеств в многомерном евклидовом пространстве. Под геометрической формой точечного множества понимается совокупность числовых параметров, определяющих взаимное положение всех точек множества с точностью до подобия. Числовые параметры формы определяются как отношения расстояний между точками к расстояниям между вершинами некоторого базисного симплекса. Базисный симплекс выбирается в заданном множестве точек. Показано, что геометрическая форма множества или совокупность числовых параметров не зависит от выбора базисного симплекса. Переход от одного базисного симплекса к любому другому приводит к пересчету значений параметров формы по формулам линейного преобразования. Многомерный объект, геометрическую форму которого предполагается описать числовыми параметрами, предварительно подвергается симплицальной аппроксимации. Такая аппроксимация рассматривается как симплицальный комплекс, имеющий комбинаторную структуру. Если совокупность параметров задается предварительно, то в статье приводятся условия, которым должны удовлетворять значения параметров формы. Приводятся несколько примеров, иллюстрирующих описанный подход. Предложенный подход может быть применен к решению ряда теоретических и прикладных задач инженерной геометрии в области многомерной геометрической морфометрии.

Ключевые слова: геометрическая форма, параметризация, симплекс, комплекс, симплицальная аппроксимация, преобразование подобия, геометрическая морфометрия.

Для цитирования: Юрков В. Ю., Чижик М. А. Параметризация геометрической формы многомерных конечных нерегулярных точечных множеств // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-13-18. EDN: GFDAVO.



© Юрков В. Ю., Чижик М. А., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

GEOMETRIC SHAPE PARAMETERIZATION OF MULTIDIMENSIONAL FINITE NON-REGULAR POINT SETS

V. Yu. Yurkov, M. A. Chizhik

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The paper is devoted to a formal approach to parameterization the geometric shape of spatial point irregular sets in multidimensional Euclidean space. The geometric shape of the point set is described by means of the set of numerical parameters that determine the relative position of all points of the set up to similarity. Numeric shape parameters are defined as ratios of distances between given points and vertices of some basis simplex. The basis simplex is selected at the given set of points. It is shown that geometric shape of the set or the set of numerical parameters does not depend on the choice of the basis simplex. Change of the basis means recalculation of shape parameters values by linear transformation formulas. A multidimensional object, the geometric shape of which is supposed to be described by numerical parameters, is previously subjected to simplicial approximation. Such an approximation is considered as a simplicial complex having a combinatorial structure. The paper also shows that all values of the shape parameters have to be satisfy some conditions that generate some area in the multidimensional space of parameters. To illustrate the described approach several examples are given. The proposed approach can be applied to solving a number of theoretical and applied problems of engineering geometry in the field of multidimensional geometric morphometry.

Keywords: geometric shape, parameterization, simplex, complex, simplicial approximation, similarity, geometric morphometry.

For citation: Yurkov V. Yu., Chizhik M. A. Geometric shape parameterization of multidimensional finite non-regular point sets. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-13-18. EDN: GFDAVO.



© Yurkov V. Yu., Chizhik M. A., 2025.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В инженерной геометрии, и в частности в теории параметризации, геометрическая форма фигуры определяется совокупностью независимых числовых параметров, инвариантных относительно движений пространства, в котором рассматривается фигура [1, 2]. В техническом дизайне геометрическая форма фигуры определяется как некоторое визуально воспринимаемое свойство, которое сопоставляется с визуально воспринимаемыми свойствами какой-либо известной геометрической фигуры [3, 4]. Это образный подход, формализовать который достаточно сложно. Поскольку таких, определенных по геометрической форме фигур, конечное множество, а формальное определение геометрической формы фигуры отсутствует, то возникают сложности при математическом описании такого понятия, как геометрическая форма.

В геометрической морфометрии — сравнительно новом подходе к анализу образов — используются декартовы координаты специально задаваемых точек — меток, расставляемых на анализируемых объектах [5, 6]. Эти метки определяют пространственную конфигурацию объекта и его расположение в пространстве форм. Такой подход позволяет исключить влияние размеров и положения объекта на результаты анализа формы.

В данной работе в качестве геометрических объектов рассматриваются точечные образы, представляющие собой нерегулярные точечные сети, допускающие разбиение на симплексы или объединение симплексов различных размерностей [7–9]. Их можно назвать точечными комплексами или полигональными моделями, или политоппными моделями, если они расположены в многомерном пространстве. Геометрическая форма таких объектов будет определяться совокупностью независимых числовых параметров [10]. Однако они должны быть вычислены относительно выбранного точечного базиса и быть инвариантными относительно преобразования подобия.

Параметризация формы n -мерного симплекса

Пусть $A_i, i = 0, \dots, n$, есть множество независимых точек n -мерного евклидова пространства. Они образуют n -симплекс A^n . Если координаты всех его вершин известны, то симплекс задан в пространстве метрически и позиционно. Число параметров симплекса равно $n(n + 1)$. Если известны только расстояния между вершинами, то симплекс может быть задан только метрически и определен с точностью до движения при условии, что расстояния заданы не произвольно, а подчиняются некоторым ограничениям, которые можно назвать условиями существования симплекса. Число параметров равно C_{n+1}^2 . Любая пара вершин $A_i, A_j, i < j$, образует 1-симплекс, который можно назвать базисным 1-сим-

плексом симплекса A^n . Тогда образуются следующие отношения:

$$a_{ik} = \frac{|A_i A_k|}{|A_i A_j|}, \quad a_{jk} = \frac{|A_j A_k|}{|A_i A_j|},$$

$$k = 0, \dots, i - 1, i + 1, \dots, j - 1, j + 1, \dots, n;$$

$$a_{0k} = \frac{|A_0 A_k|}{|A_i A_j|},$$

$$k = 1, \dots, i - 1, i + 1, \dots, j - 1, j + 1, \dots, n;$$

$$a_{ik} = \frac{|A_i A_k|}{|A_i A_j|},$$

$$k = 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, j - 1, j + 1, \dots, n;$$

...

$$a_{n-1,n} = \frac{|A_{n-1} A_n|}{|A_i A_j|}, \quad i \neq n - 1, \quad j \neq n. \quad (1)$$

Число этих отношений равно $(n^2 + n - 2)/2$. Они определены относительно базисного 1-симплекса $A_i A_j$, поэтому множество этих отношений обозначим символом $\{a_{ij}\}$. Они определяют симплекс с точностью до подобия, то есть определяют геометрическую форму n -симплекса. Однако необходимо учитывать, что эти отношения не могут быть заданы произвольно. Они тоже должны удовлетворять условиям существования n -симплекса.

Условия существования n -симплекса

Рассмотрим условия существования n -симплекса для множества параметров $a_{0,i'}, \dots, a_{n-1,n}$. Первое условие очевидно: вершина A_2 не должна лежать на прямой $A_0 A_1$. Поэтому если один параметр, например $a_{0,2}$, задается произвольно, то второй параметр должен удовлетворять условию $a_{0,2} - 1 < a_{1,2} < a_{0,2} + 1$. Выберем систему координат так, чтобы начало координат было в вершине A_0 , ось Ox_1 совпала по направлению с ребром $A_0 A_1$, а все остальные i -е вершины имели неотрицательными свои координаты от 0-й до i -й и нулевыми все остальные:

$$A_0(0, \dots, 0), A_1(x_{1,1}, 0, \dots, 0), A_2(x_{1,2}, x_{2,2}, 0, \dots, 0), \dots,$$

$$A_i(x_{1,i}, \dots, x_{i,i}, 0, \dots, 0), \dots, A_n(x_{1,n}, \dots, x_{n,n}).$$

Тогда для определения числового промежутка существования очередного параметра $a_{j-1,j}$ необходимо решить систему уравнений

$$\sum_{i=1}^{j-1} (x_{i,j} - x_{i,k})^2 = (a_{k,j-1})^2 (A_0 A_1)^2,$$

$$k = 0, \dots, j - 2.$$

Решением будет пара точек $A_j^{(1)}(\dots, x_{j-1,j}^{(1)} > 0, 0, \dots, 0)$, $A_j^{(2)}(\dots, x_{j-1,j}^{(2)} < 0, 0, \dots, 0)$. Условием выбора параметра $a_{j-1,j}$ является

$$|A_{j-1}A_j^{(1)}|/|A_0A_1| < a_{j-1,j} < |A_{j-1}A_j^{(1)}|/|A_0A_1|.$$

Таким образом, n -симплекс будет определен с точностью до подобия следующим множеством параметров:

$$\dots \{a_{\dots}^{01}\} = \{a_{0,2}^{01}, a_{1,2}^{01}, a_{0,3}^{01}, a_{1,3}^{01}, \dots, a_{2,3}^{01}, a_{3,4}^{01}, \dots, a_{n-1,n}^{01}\}.$$

Условие эквивалентности геометрической формы двух симплексов можно сформулировать следующим образом. Пусть заданы два n -симплекса A^n и B^n . Для симплекса A^n существует C_{n+1}^2 систем $\{a_{\dots}^{\#}\}$ параметризации геометрической формы. Для B^n существует такое же число систем $\{b_{\dots}^{\#}\}$ параметризации формы.

ТЕОРЕМА. Если для двух n -симплексов A^n и B^n , $A^n \neq B^n$, какая-либо из систем параметризации $\{a_{\dots}^{\#}\}$ с точностью до перестановки индексов совпадает с какой-либо системой $\{b_{\dots}^{\#}\}$, то данные симплексы обладают одной и той же геометрической формой или, другими словами, эквивалентны по форме.

Доказательство теоремы основано на комбинаторном анализе множества систем параметризации. Мы здесь не приводим его ввиду экономии места. Оно будет приведено в статье, посвященной теоретическим аспектам многомерной морфометрии.

Пример 1. Множество треугольников на плоскости параметров формы располагаются в виде точек открытой области

$$\{S_1 : a_{02} + a_{12} - 1 > 0\} \cap \{S_2 : -a_{02} + a_{12} - 1 < 0\} \cap \{S_3 : a_{02} - a_{12} - 1 < 0\}.$$

Подмножество равносторонних треугольников: $a_{02} = a_{12} = 1$.

Подмножество равнобедренных треугольников:

$$\{S_1 : a_{02} = 1, 0 < a_{12} < 2\} \cup \{S_2 : 0 < a_{02} < 2, a_{12} = 1\} \cup \left\{ S_3 : a_{02} = a_{12}, \frac{1}{2} < a_{02} < \infty \right\}.$$

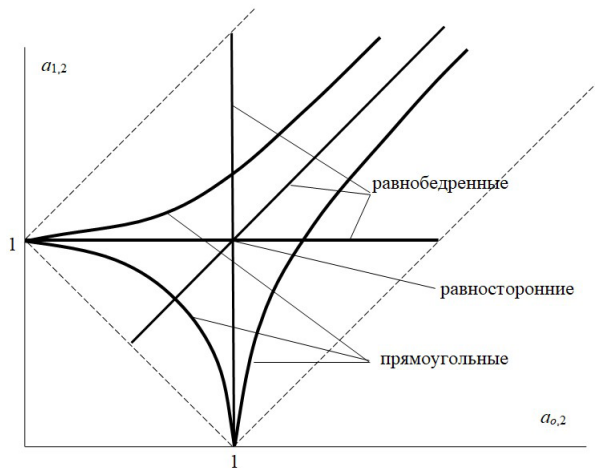


Рис. 1. Область треугольников в пространстве параметров формы
 Fig. 1. Triangles areas in the space of parameters

Подмножество прямоугольных треугольников:

$$\{S_1 : (a_{02})^2 + (a_{12})^2 = 1, 0 < a_{01} < 1, 0 < a_{12} < 1\} \cup \{S_2 : (a_{02})^2 = (a_{12})^2 + 1, a_{02} > 1, a_{12} > 0\} \cup \{S_3 : (a_{02})^2 = (a_{12})^2 - 1, a_{02} > 0, a_{12} > 1\}.$$

Эти подмножества показаны на рис. 1. Видно, что с увеличением значений параметров равнобедренные треугольники мало отличаются по форме от прямоугольных (длина катета стремится сравняться с длиной гипотенузы).

Пример 2. Одна из двенадцати систем параметризации правильной треугольной прямой призмы с единичными ребрами есть $\{1, 1, 1, 2^{1/2}, 2^{1/2}, 1, 2^{1/2}, 2^{1/2}, 1, 1, 1\}$. Одна из двадцати четырех систем параметризации куба с единичными ребрами есть $\{2^{1/2}, 1, 1, 2^{1/2}, 1, 2^{1/2}, 2^{1/2}, 1, 3^{1/2}, 2^{1/2}, 2^{1/2}, 3^{1/2}, 1, 3^{1/2}, 2^{1/2}, 1, 2^{1/2}\}$.

Форма n -мерного точечного комплекса

Пусть $A^{n,m} \{A_i : A_i \in E^n, i = 0, \dots, m; m > n\}$ — точечный комплекс. В качестве базисного 1-симплекса можно взять любую пару вершин (1-грань) выпуклой оболочки множества $A^{n,m}$. Обозначим эту пару A_0, A_1 и примем эту 1-грань за ось x_1 координат. Ось x_2 можно взять в 2-границе выпуклой оболочки так, чтобы вершина A_2 имела положительную координату x_2 . И так далее. При таком выборе вершины $A_i, i = n + 1, \dots, m$ не могут иметь отрицательных значений координат. Общее число параметров формы комплекса равно $(n^2 + n - 2)/2 + 2(n - m)$. Общее число базисных симплексов равно C_{m+1}^{n+1} . Поэтому общее число всех возможных параметризаций формы комплекса равно $C_{m+1}^{n+1} \cdot 2(n - m)$. Обозначим множество всех возможных параметризаций формы комплекса как $\{a_{\dots}^{\#}\}$, а конкретную параметризацию — как $\{a_{\dots}^{\#}\}, i = 1, \dots, C_{m+1}^{n+1} \cdot 2(n - m)$.

ТЕОРЕМА. Два комплекса $A^{n,m}$ и $B^{n,m}$ эквивалентны по форме, если в $\{a_{\dots}^{\#}\}$ и в $\{b_{\dots}^{\#}\}$ найдутся такие параметризации $\{a_{\dots}^{\#}\}, \{b_{\dots}^{\#}\}$, что $\{a_{\dots}^{\#}\} = \{b_{\dots}^{\#}\}$ с точностью до перестановки их элементов.

Доказательство этой теоремы также основано на комбинаторном анализе множества систем параметризации комплексов. Оно также будет приведено в статье, посвященной теоретическим аспектам многомерной морфометрии.

Пример 3. В качестве примера рассмотрим параметризацию формы комплекса $A^{2,m}$. Выберем любую сторону выпуклой оболочки комплекса и обозначим её A_0A_1 . Также обозначим её длину. Будем считать её базисным 1-симплексом. Имеем параметризацию

$$a_{0,i}^{0,1} = \frac{A_0A_i}{A_0A_1}, \quad a_{1,i}^{0,1} = \frac{A_1A_i}{A_0A_1}, \quad i = 2, \dots, m.$$

Выберем другую сторону выпуклой оболочки комплекса, например, $A_pA_q, p = 0, \dots, m - 1, q = 1, \dots, m$. Будем считать её другим базисным 1-симплексом. Имеем параметризацию

$$a_{p,i}^{p,q} = \frac{A_pA_i}{A_pA_q}, \quad a_{q,i}^{p,q} = \frac{A_qA_i}{A_pA_q}, \quad i = 0, \dots, m, i \neq p, i \neq q.$$

Поскольку форма комплекса не изменилась, должны существовать формулы перехода от одной

параметризации к другой. Другими словами, обе параметризации должны быть связаны линейными уравнениями. Некоторые из них очевидны:

$$\alpha_{p,0}^{p,q} = \alpha_{0,p}^{0,1} \frac{A_0 A_1}{A_p A_q}, \quad \alpha_{q,0}^{p,q} = \alpha_{0,q}^{0,1} \frac{A_0 A_1}{A_p A_q},$$

$$\alpha_{p,1}^{p,q} = \alpha_{1,p}^{0,1} \frac{A_0 A_1}{A_p A_q}, \quad \alpha_{q,1}^{p,q} = \alpha_{1,q}^{0,1} \frac{A_0 A_1}{A_p A_q}.$$

Обозначим $P_{p,i}$ — периметр четырехугольника $A_0 A_1 A_p A_i$, а $P_{q,i}$ — периметр четырехугольника $A_0 A_1 A_q A_i$. Выразив длины сторон четырехугольников при помощи введенных параметризаций, получим

$$\alpha_{p,i}^{p,q} = \frac{P_{p,i}}{A_p A_q} - \frac{A_0 A_1}{A_p A_q} (\alpha_{0,p}^{0,1} + \alpha_{1,i}^{0,1} + 1),$$

$$\alpha_{q,i}^{p,q} = \frac{P_{q,i}}{A_p A_q} - \frac{A_0 A_1}{A_p A_q} (\alpha_{0,q}^{0,1} + \alpha_{1,i}^{0,1} + 1).$$

Пример 4. Рассмотрим параметризацию формы комплекса $A^{3,m}$. Выберем любое одномерное ребро выпуклой оболочки комплекса и обозначим его $A_0 A_1$. Также обозначим его длину. Будем считать его базисным 1-симплексом. Выберем какое-либо другое одномерное ребро и обозначим его $A_p A_q$. Также обозначим его длину. Будем считать его другим базисным 1-симплексом. Имеем две параметризации базисного 3-симплекса $A_0 A_1 A_p A_q$

$$\alpha_{0,p}^{0,1} = \frac{A_0 A_p}{A_0 A_1}, \quad \alpha_{0,q}^{0,1} = \frac{A_0 A_q}{A_0 A_1},$$

$$\alpha_{1,p}^{0,1} = \frac{A_1 A_p}{A_0 A_1}, \quad \alpha_{1,q}^{0,1} = \frac{A_1 A_q}{A_0 A_1}, \quad \alpha_{p,q}^{0,1} = \frac{A_p A_q}{A_0 A_1},$$

$$\alpha_{p,0}^{p,q} = \frac{A_0 A_p}{A_p A_q}, \quad \alpha_{q,0}^{p,q} = \frac{A_0 A_q}{A_p A_q},$$

$$\alpha_{p,1}^{p,q} = \frac{A_1 A_p}{A_p A_q}, \quad \alpha_{q,1}^{p,q} = \frac{A_1 A_q}{A_p A_q}, \quad \alpha_{0,1}^{p,q} = \frac{A_0 A_1}{A_p A_q}.$$

Пусть $A_i A_j$ — какое-либо одномерное ребро комплекса, $i \neq 0, i \neq 1, i \neq p, i \neq q, j \neq 0, j \neq 1, j \neq p, j \neq q$. Тогда это ребро можно параметризовать как относительно базисного 1-симплекса $A_0 A_1$, так и относительно базисного 1-симплекса $A_p A_q$. Следовательно, между двумя различными параметризациями должны существовать линейные уравнения связи. Имеем

$$\alpha_{0,i}^{0,1} = \frac{A_0 A_i}{A_0 A_1}, \quad \alpha_{0,j}^{0,1} = \frac{A_0 A_j}{A_0 A_1},$$

$$\alpha_{1,i}^{0,1} = \frac{A_1 A_i}{A_0 A_1}, \quad \alpha_{1,j}^{0,1} = \frac{A_1 A_j}{A_0 A_1}, \quad \alpha_{i,j}^{0,1} = \frac{A_i A_j}{A_0 A_1},$$

$$\alpha_{p,i}^{p,q} = \frac{A_p A_i}{A_p A_q}, \quad \alpha_{p,j}^{p,q} = \frac{A_p A_j}{A_p A_q},$$

$$\alpha_{q,i}^{p,q} = \frac{A_q A_i}{A_p A_q}, \quad \alpha_{q,j}^{p,q} = \frac{A_q A_j}{A_p A_q}, \quad \alpha_{i,j}^{p,q} = \frac{A_i A_j}{A_p A_q}.$$

Тогда, опуская вывод, получим

$$\alpha_{p,i}^{p,q} = \frac{P_{p,i}}{A_p A_q} - \frac{A_0 A_1}{A_p A_q} (\alpha_{0,p}^{0,1} + \alpha_{1,p}^{0,1} + \alpha_{0,i}^{0,1} + \alpha_{1,i}^{0,1} + 1),$$

$$\alpha_{q,i}^{p,q} = \frac{P_{q,i}}{A_p A_q} - \frac{A_0 A_1}{A_p A_q} (\alpha_{0,q}^{0,1} + \alpha_{1,q}^{0,1} + \alpha_{0,i}^{0,1} + \alpha_{1,i}^{0,1} + 1).$$

Здесь $P_{p,i}$ и $P_{q,i}$ — сумма длин ребер соответствующих 3-симплексов.

Параметризация формы некоторых специальных комплексов

Рассмотрим параметризацию формы комплекса $A^{1,m} \in E^n, m > n$. Предположим, что никакие k смежные 1-симплексов не лежат в одной $(k - 1)$ -плоскости. Выберем любые n смежных 1-симплексов, образующих связный подкомплекс. Например, подкомплекс с вершинами A_0, \dots, A_n . Параметризация его геометрической формы выполняется так, как описано выше. Добавление вершины A_{n+1} требует n параметров, вычисленных относительно вершин A_1, \dots, A_n . И так далее. В результате на заданный комплекс будет «натяннут» n -мерный комплекс $A^{n, m-n+1}$, состоящий из $m - n + 1$ n -симплексов. При этом

$$A^{n,i} \cap A^{n,i+1} = A^{n-1,i}, \quad i = 0, \dots, m - n. \quad (1)$$

Общее число параметров формы будет $(n^2 + n - 2) / 2 + n(m - n)$. Схема описанной параметризации приведена на рис. 2.

Рассмотрим комплекс $A^{2,m} \in E^n, m > n$.

Пусть у него каждые два смежных 2-симплекса имеют общую вершину. Понятно, что m — четное.

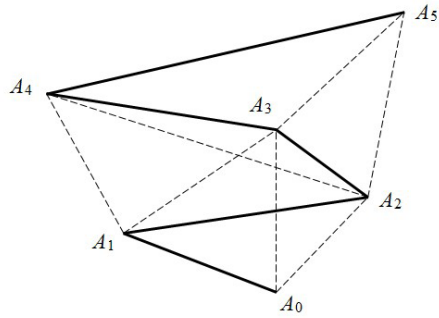


Рис. 2. Схема параметризации формы пространственной ломаной (комплекса $A^{1,5}$)
 Fig. 2. Parameterization scheme of the spatial polyline shape (complex $A^{1,5}$)

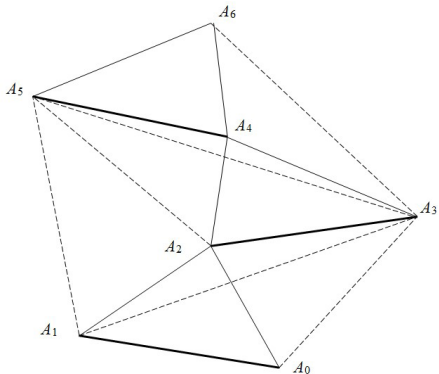


Рис. 3. Схема параметризации формы двумерного пространственного комплекса
 Fig. 3. Scheme of parameterization of the shape of a two-dimensional spatial complex

Пусть смежными будут вершины A_2, A_4, \dots, A_{m-2} . Пусть нумерация 2-симплексов $A^{2,i/2}$, где i — меньший из двух номеров смежной вершины. Независимость множества 2-симплексов означает, что никакие два смежных 2-симплекса не лежат в одной 3-плоскости.

Пусть n четное. Тогда форма n -симплекса $A^{2,m/2}$ параметризуется так, как описано выше. Пусть $i = 0$. Тогда n -симплекс образуется вершинами A_0, \dots, A_n . Для определения положения вершины A_{n+1} потребуется $n - 1$ параметров, вычисленных относительно вершин A_1, \dots, A_{n-1} . То есть будет выделен n -симплекс с вершинами A_1, \dots, A_{n+1} , имеющий с предыдущим общую $(n - 1)$ -мерную грань с вершинами A_1, \dots, A_n . Для определения положения следующей вершины A_{n+2} потребуется $n - 2$ параметров, вычисленных относительно вершин A_2, \dots, A_{n-1} . То есть будет выделен следующий n -симплекс с вершинами A_2, \dots, A_{n+2} .

Пусть n нечетное и $i = 0$. Тогда для определения положения вершины A_{n+1} потребуется $n - 2$ параметров, вычисленных относительно вершин A_1, \dots, A_{n-2} . И так далее. В итоге на комплекс $A^{2,m}$ будет «натянута» комплекс $A^{n, m - n + 1}$, состоящий из $m - n + 1$ n -симплексов, для которых сохраняется условие (1). Схема такой параметризации показана на рис. 3.

Аналогично можно рассмотреть комплексы $A^{2,m}$, у которых смежные 2-симплексы имеют общую n -мерную грань. Все эти рассуждения обобщаются на комплексы $A^{p,m}$, $p \leq n$. Общий вывод заключается в том, что для определения параметров геометрической формы точечного множества (комплекса) в E^n на него нужно «натянуть» $m - n + 1$ n -симплексов, связанных общими $(n - 1)$ -мерными гранями.

Заключение

Как показал анализ литературы, геометрическая форма объектов играет существенную роль в прикладных исследованиях, связанных с анализом образов. Однако опубликованных научных работ, в которых геометрическая форма объекта была бы предметом численного анализа, крайне мало. В данной статье сделана попытка рассмотреть некоторые подходы к численному анализу геометрической формы многомерного объекта, представленному как результат симплицальной аппроксимации.

Геометрическая форма многомерного объекта описывается конечным множеством числовых параметров, которые представляют собой отношения длин ребер аппроксимирующих симплексов к длинам выбранного базисного симплекса.

Список источников / References

1. Кондусов Д. В., Кондусова В. Б. Сравнительный анализ методов поиска 3D-моделей изделий машиностроения по их геометрической форме // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103, № 10. С. 873–876. DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-10-873-876. EDN: FTJILC.
2. Kondusov D. V., Kondusova V. B. Sravnitel'nyy analiz metodov poiska 3D-modeley izdeliy mashinostroyeniya po ikh geometricheskoy forme [Comparative analysis of methods for searching of 3D models of mechanical engineering products by their geometric shape]. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2024. Vol. 103, no. 10. P. 873–876. DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-10-873-876. EDN: FTJILC. (In Russ.).
3. Виноградова Г. Л., Захарова Е. А. Автоматизация инженерного анализа изделий сложной геометрической формы в T-FLEXCAD // Вестник Костромского государственного

у технологического университета. 2011. № 1 (26). С. 66–71. EDN: OGIRQN.

Vinogradova G. L., Zazharova E. A. Avtomatizatsiya inzhenernogo analiza izdeliy slozhnoy geometricheskoy formy v T-FLEXCAD [Automatization of engineering analysis of complex geometric shape of products in T-FLEX CAD]. *Vestnik Kostromskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2011. No. 1 (26). P. 66–71. EDN: OGIRQN. (In Russ.).

3. Бырдина М. В., Мищик М. Ф., Бельшева В. С. Расчет и оптимизация геометрических параметров изделий легкой промышленности конической формы // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2022. Т. 56, № 2. С. 52–56. DOI: 10.46418/0021-3489-2022-56-02-10. EDN: CDWGTK.

Byrdina M. V., Mitsik M. F., Belysheva V. S. Raschet i optimizatsiya geometricheskikh parametrov izdeliy legkoy promyshlennosti konicheskoy formy [Calculation and optimization of geometric parameters of light industry products of conical shape]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti. The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*. 2022. Vol. 56, no. 2. P. 52–56. DOI: 10.46418/0021-3489-2022-56-02-10. EDN: CDWGTK. (In Russ.).

4. Казакова Н. А., Иванова О. В., Хамматова В. В. Геометрическая классификация сложных пространственных форм в одежде и интерьерном текстиле // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 3. С. 91–94. EDN: XXQHSN.

Kazakova N. A., Ivanova O. V., Khammatova V. V. Geometricheskaya klassifikatsiya slozhnykh prostranstvennykh form v odezhde i inter'yernom tekstile [Geometric classification of complex spatial shapes in clothing and interior textiles]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. Herald of Technological University*. 2017. Vol. 20, no. 3. P. 91–94. EDN: XXQHSN. (In Russ.).

5. Васильев А. Г., Васильева И. А. Геометрическая морфометрия в популяционной экологии: новые возможности и научные перспективы // Принципы экологии. 2016. № 3 (19). С. 34. EDN: WOIRUN.

Vasilyev A. G., Vasilyeva I. A. Geometricheskaya morfometriya v populyatsionnoy ekologii: novyye vozmozhnosti i nauchnyye perspektivy [Geometric morphometrics in populatative ecology: New possibilities and scientific perspectives]. *Printsipy ekologii. Principles of the Ecology*. 2016. No. 3 (19). P. 34. EDN: WOIRUN. (In Russ.).

6. Мандрица С. А. К использованию геометрической морфометрии в ихтиологии // Вестник Пермского университета. 2007. № 5 (10). С. 38–52. EDN: PAVBYD.

Mandritsa S. A. K ispol'zovaniyu geometricheskoy morfometrii v ikhtiologii [On the use of geometric morphometrics in ichthyology]. *Vestnik Permskogo universiteta. Bulletin of Perm University*. 2007. No. 5 (10). P. 38–52. EDN: PAVBYD. (In Russ.).

7. Чижов М. И., Усупхов А. А., Троценко А. С. Метод точной оценки близости геометрических форм полигональных моделей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 118–122. EDN: XWPOAH.

Chizhov M. I., Uspekhov A. A., Trotsenko A. S. Metod tochnoy otsenki blizosti geometricheskikh form poligonal'nykh modeley [The precise method of the geometric forms similarity estimation for the polygonal models]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii. Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2018. No. 2. P. 118–122. EDN: XWPOAH. (In Russ.).

8. Тарасова А. С. Методы определения оптимальной геометрической формы кластеров в задачах кластерного анализа // Информационные технологии. 2008. № 2. С. 10–15. EDN: KFQGHZ.

Tarasova A. S. Metody opredeleniya optimal'noy geometricheskoy formy klasterov v zadachakh klaster'nogo analiza

[Detecting optimal geometrical cluster forms in clusterization problems]. *Informatsionnyye tekhnologii. Information Technologies*. 2008. No. 2. P. 10–15. EDN: KFQGHZ. (In Russ.).

9. Лаптева Е. Н. Методика получения и анализа пространственной формы объекта на основе трехмерных координат точек его поверхности. Москва, 2004. Деп. в ВИНТИ РАН 05.04.2004, № 556-B2004.

Lapteva E. N. Metodika polucheniya i analiza prostranstvennoy formy ob'ekta na osnove trekhmernykh koordinat tochek ego poverkhnosti [Method for obtaining and analyzing the spatial shape of an object based on the three-dimensional coordinates of its surface points]. Moscow, 2004. Deposited in VINITI RAS. 05.04.2004. No. 556-B2004. (In Russ.).

10. Косников Ю. Н. Целочисленная параметризация геометрических форм на координатной плоскости // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 12 (138). С. 1–9. DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.15 EDN: JHSQRE.

Kosnikov Yu. N. Tselochislennaya parametrizatsiya geometricheskikh form na koordinatnoy ploskosti [Integer parameterization of geometric shapes on the coordinate plane]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. International Research Journal*. 2023. No. 12 (138). P. 1–9. DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.15. EDN: JHSQRE. (In Russ.).

ЮРКОВ Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Конструирование и технологии изделий легкой промышленности» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2414-1438

AuthorID (РИНЦ): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Адрес для переписки: viktor_yurkov@mail.ru

ЧИЖИК Маргарита Анатольевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Конструирование и технологии изделий легкой промышленности» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7582-7019

AuthorID (РИНЦ): 474040

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

ORCID: 0000-0003-0797-875X

Адрес для переписки: margarita-chizhik@rambler.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 11.04.2025; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 04.07.2025.

YURKOV Viktor Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Design and Technology of Light Industry Product Manufacture Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2414-1438

AuthorID (RSCI): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Correspondence address: viktor_yurkov@mail.ru

CHIZHIK Margarita Anatolyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Design and Technology of Light Industry Product Manufacture Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7582-7019

AuthorID (RSCI): 474040

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

ORCID: 0000-0003-0797-875X

Correspondence address: margarita-chizhik@rambler.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 11.04.2025; approved after reviewing 15.05.2025; accepted for publication 04.07.2025.

ЦИФРОВОЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ

Е. К. Савич

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, г. Самара

В данной статье проведено исследование процессов цифровизации системы менеджмента качества на промышленных предприятиях путем разработки и внедрения специализированного цифрового инструментария, предназначенного для управления качеством на различных этапах жизненного цикла продукции. Разработанный цифровой инструментарий представляет собой комплекс интегрированных сервисов и программных модулей, обеспечивающих автоматизацию и оптимизацию ключевых процессов контроля и управления качеством. В рамках исследования предложена структурная модель цифрового инструментария, детализирован перечень необходимых цифровых инструментов, а также обоснована их значимость для повышения эффективности функционирования предприятий в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: цифровая платформа, цифровой инструментарий, управление качеством, система менеджмента качества, бизнес-процессы, жизненный цикл продукции.

Для цитирования: Савич Е. К. Цифровой инструментарий управления качеством на этапах жизненного цикла продукции // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 19–26. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-19-26. EDN: DIANIA.



© Савич Е. К., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DIGITAL QUALITY MANAGEMENT TOOLKIT AT PRODUCT LIFECYCLE STAGES

E. K. Savich

Samara National Research University, Samara, Russia

This article studies the processes of digitalization of the quality management system at industrial enterprises by developing and implementing specialized digital tools designed to manage quality at various stages of the product life cycle. The developed digital toolkit is a set of integrated services and software modules that provide automation and optimization of key quality control and management processes. As part of the study, a structural model of digital tools is proposed, a list of necessary digital tools is detailed, and their significance is justified to increase the efficiency of enterprises in the context of digital transformation.

Keywords: digital platform, digital tools, quality management, quality management system, business processes, product life cycle.

For citation: Savich E. K. Digital quality management toolkit at product lifecycle stages. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 19–26. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-19-26. EDN: DIANIA.



© Savich E. K., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В условиях быстро меняющегося рынка и стремительного развития технологий цифровизация системы менеджмента качества становится неотъ-

емлемой частью стратегического управления организацией. Этот процесс включает в себя внедрение передовых цифровых решений, которые позволяют оптимизировать и автоматизировать процессы про-



Рис. 1. Структурная модель цифровой платформы СМК
 Fig. 1. Structural model of the QMS digital platform



Рис. 2. Цифровой инструментарий процессов управления СМК организации
 Fig. 2. Digital toolkit of the organisation's QMS management processes

изводства на всех этапах жизненного цикла продукции [1 – 3].

Как отмечается в [4 – 6], цифровизация проникает во многие сферы жизни и деятельности человека, в том числе и в систему менеджмента качества (СМК) организаций. Цифровые технологии, такие как Big Data, IoT, блокчейн, могут быть интегрированы в СМК и будут полезны предприятию.

Также можно отметить, что цифровая трансформация оптимизирует задачи по управлению качеством, которые приходится выполнять персоналу любой организации. При переходе к цифровым технологиям главная задача состоит в том, чтобы переорганизовать процессы и процедуры таким образом, чтобы как люди, так и программные продукты могли обеспечить стабильность и повышение качества [7].

Благодаря интеграции технологий цифровизации систем менеджмента качества бизнес-процессов предприятия обеспечивается прозрачность данных бизнес-процессов, их синхронизация; повышается возможность сбора актуальных данных о конкретном изделии, выделения его ключевых характеристик; обеспечивается доступность управ-

ления проектами, возможность визуализации всех стадий жизненного цикла изделия, своевременного внесения изменений на обнаруженные несоответствия, направленные на их устранение [8].

Цифровизация СМК может решаться за счет создания киберфизических систем, повышающих скорость процессов проектирования и производство продукции, а также обеспечивающих стабильность качества выпускаемой продукции и минимизацию себестоимости изготовления [9].

В работе [10] разработана структурная модель цифровой платформы системы менеджмента качества, которая описывает архитектуру взаимодействия процессов, процедур, а также функциональные возможности цифровых сервисов системы менеджмента качества промышленного предприятия (рис. 1).

Представленная автором модель цифровой платформы системы менеджмента качества имеет модульную структуру, ключевыми компонентами которой является цифровой инструментарий управления качеством на этапах жизненного цикла продукции.

Цифровой инструментарий управления качеством

Перечень цифрового инструментария основывается на требованиях ISO 9001:2015 и на конкретно определенных процессах предприятия, которые могут быть автоматизированы и контролируемы с использованием цифровых технологий [11, 12] и определяются тремя основными группами процессов:

1. Процессы управления организацией.
2. Основные процессы организации.
3. Обеспечивающие процессы.

Процессы управления СМК организации определяют стратегию, цели и политику организации в области качества, а также обеспечивают контроль и непрерывное улучшение системы. Цифровизация данных процессов позволит достичь высокой эффективности работы организации. В работе предложен цифровой инструментарий определения контекста организации и управления системой менеджмента качества (рис. 2).

Определение контекста организации

Организация должна иметь свою контекстную модель, проводить ее мониторинг, а также анализ сильных и слабых сторон. Необходимо идентифицировать всех заинтересованных сторон, имеющих отношение к системе менеджмента качества, вне зависимости от степени их влияния на деятельность организации. Для эффективного управления процессами СМК на предприятии необходимо не только определять данные процессы, но и детализировать и совершенствовать их.

Ключевым процессом контекста организации является анализ удовлетворенности потребителей и заинтересованных сторон. Он позволяет принимать управленческие решения при проведении корректирующих и предупреждающих действий по постановке и достижении целей по качеству, управления процессами и при анализе специфических требований заинтересованных сторон.

Бизнес-логика процесса определения контекста организации в системе менеджмента качества, позволяющая визуализировать рамку процесса и установить взаимосвязь с участниками процесса, а также между входными и выходными параметрами процесса. Анализ процесса позволил определить основные процедуры, которые необходимо включить в данный цифровой инструментарий (рис. 2):

- модуль определения контекстной модели системы менеджмента качества;
- модуль определения процессной модели системы менеджмента качества;
- модуль анализа специфических требований потребителей;
- модуль анализа удовлетворенности потребителей.

Управление системой менеджмента качества представляет собой совокупность управленческих процессов, охватывающих весь жизненный цикл продукции, а также систему стратегических мероприятий, направленных на повышение качества продукции и обеспечение эффективного функционирования системы менеджмента качества.

К основным задачам процесса управления СМК относятся:

- проведение оценки рисков и возможностей процессов СМК при помощи всех собранных данных о предприятии;
- формирование целей по качеству потребителей и высшего руководства;

— приведение всех процессов в соответствие требованиям стандартов, специфическим требованиям заказчиков и собственным требованиям организации;

— решение определенных возникающих на предприятии проблем с помощью методики решения проблем по качеству 8D;

— сбор и предоставление статистики;

— анализ действующей СМК, способы и ресурсы по ее улучшению;

— систематизация полученных данных;

— составление панели упорядоченной информации с точными подсчетами необходимых индексов, процентов, ведомости мероприятий;

— анализ уровня удовлетворенности внутренних и внешних потребителей;

— составление отчетов по несоответствиям продукции, процессов и оборудования;

— составление чек-листов и планов по аудитам под запросы пользователей.

Программное обеспечение для управления системой менеджмента качества должно включать в себя разнообразные функции, направленные на оптимизацию процессов, соответствие стандартам и улучшение качества продукции или услуг. Функционал программного обеспечения представлен на рис. 2 и включает в себя:

— модуль оценки рисков и возможностей процессов СМК;

— модуль анализа системных несоответствий качества продукции и СМК;

— модуль постановки целей по качеству продукции;

— модуль построения панели KPI процессов;

— модуль проведения аудитов СМК, процессов, продукции;

— модуль решения проблем по качеству;

— модуль управления на основе цикла PDCA;

— модуль анализа со стороны руководства.

Цифровизация **основных процессов СМК** напрямую влияет на повышение качества продукции за счет регистрации и накопления больших объемов данных, автоматизация подтверждения соответствия продукции требованиям и исключения субъективной составляющей оценки, применения технологий искусственного интеллекта на этапах мониторинга и контроля, увеличения скорости принятия ответственных решений в неоднозначных ситуациях, а также обеспечения стабильности выполнения всех процессов и снижения рисков появления несоответствий. В зависимости от этапов жизненного цикла продукции проведенный в работе анализ показывает необходимость в разработке цифрового инструментария управления качеством в первую очередь на этапах управления проектированием и разработкой продукции и процессов, управление закупками и поставками, а также управление производственным процессом.

Управление проектированием и разработкой продукции и процессов регламентирует порядок и методологию проектирования и разработки продукции, а также проектирования, разработки и валидации технологических процессов и производства. Цифровой инструментарий основан на структурированном подходе к идентификации и своевременному выполнению поставщиком всех этапов работы, необходимых для удовлетворения требований и ожиданий потребителя. Методология APQP включает в себя эффективные инструменты управления рисками, такие как анализ видов и по-

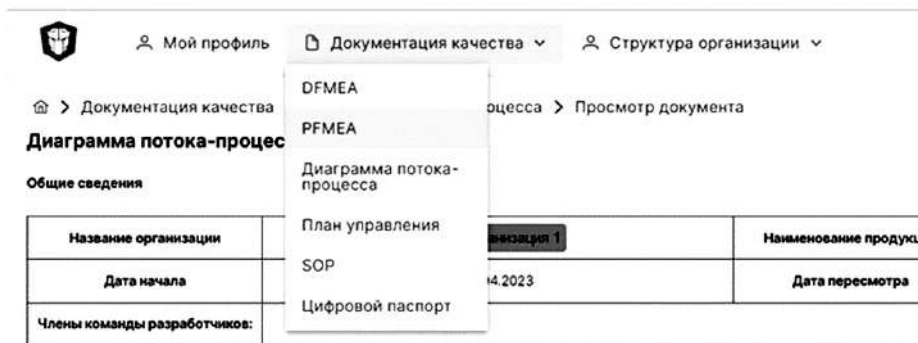


Рис. 3. Цифровой инструментарий управления проектированием и разработкой продукции и процессов
 Fig. 3. Digital toolkit for managing product and process design and development



Рис. 4. Структурная схема цифрового инструментария процесса управления качеством закупок и поставок
 Fig. 4. Structural diagram of the digital toolkit of the procurement and supply quality management process

следствий потенциальных отказов на этапах проектирования (DFMEA) и производства (PFMEA), диаграммы потоков процессов и другие аналитические методы. Выделены основные модули, входящие в его структуру:

- модуль планирования качества APQP;
- модуль оценки рисков DFMEA;
- модуль разработки диаграммы потока процесса;
- модуль оценки рисков PFMEA;
- модуль разработки плана управления;
- модуль разработки рабочей инструкции;
- модуль разработки цифрового паспорта изделия;
- модуль разработки карты контроля;
- модуль нормирования технологических операций.

На рис. 3 представлен интерфейс предложенного цифрового инструментария [13–16].

Управление качеством закупок и поставок занимает важное место в конкурентоспособности организации. Высокий уровень качества управления процессом закупок и поставок играет значительную роль в привлечении и удержании клиентов; повышает уровень их удовлетворенности, что в дальнейшей перспективе создает положительную среду, репутацию организации и стимулирует инновации. Качество поставок оказывает непосредственное влияние на затраты предприятия, связанные с приобретением производственных ресурсов, их хранением и логистикой. Эффективное взаимодействие с поставщиками способствует обеспечению ста-

бильности поставок и снижению рисков, связанных с возможными простоями оборудования.

Важным критерием эффективной работы организации является своевременность поставок, что напрямую зависит от сотрудничества с надежными поставщиками.

Цифровой инструментарий управления закупками и поставками даёт возможность анализа больших данных и прогнозирования потребностей с использованием предиктивной аналитики. Современные аналитические инструменты позволяют собирать и обрабатывать большие объёмы информации, что, в свою очередь, помогает выявить тенденции и предсказывать изменения в спросе. Это становится особенно важным в условиях нестабильности рынка, когда компании должны быстро адаптироваться к новым условиям и принимать обоснованные решения, минимизируя риски и оптимизируя запасы.

В работе предложен цифровой инструментарий управления качеством закупок и поставок сырья и комплектующих материалов, включающий следующие программные модули (рис. 4):

- модуль оценки и выбора потенциальных поставщиков;
- модуль одобрения поставки;
- модуль входного контроля;
- модуль управления несоответствиями в поставках;
- модуль мониторинга действующих поставщиков;
- модуль аудита поставщиков;



Рис. 5. Структурная схема цифрового инструментария СМК обеспечивающих процессов организации

Fig. 5. Structural diagram of the digital QMS toolkit of the organisation's supporting processes

- модуль оценки поставщиков;
- модуль развития поставщиков.

Управление производственным процессом регламентирует порядок организации и методологию управления производственными процессами с целью обеспечения их стабильности и воспроизводимости. Современное производство представляет собой сложную систему, эффективное функционирование которой обеспечивается управленческим механизмом, формирующим внутренние взаимосвязи и учитывающим взаимодействие всех уровней организационной иерархии предприятия — от рабочих до руководящего состава.

Основными задачами процесса управления производством являются:

- организация изготовления и поставки продукции;
- обеспечение необходимого уровня качества продукции;
- снижение и/или поддержание на минимальном уровне себестоимости продукции;
- соблюдение технологической дисциплины;
- соблюдение принципов ресурсосбережения;
- соблюдение производственного режима путём соответствующей организации производства и труда.

Анализ процесса управления производством выявил основные процедуры процесса, для которых необходимо разработать отдельные программные модули:

- модуль запуска рабочего места;
- модуль проведения аудитов 5S;
- модуль производственного анализа;
- модуль статистического управления технологическими процессами;
- модуль наблюдения за работой оператора;
- модуль управления несоответствующей продукцией;
- модуль быстрого решения проблем в производстве.

Обеспечивающие процессы предприятия не создают продукцию или услуги напрямую, но поддерживают основные и управленческие процессы, обеспечивая их стабильность и эффективность. Они играют критически важную роль

в работе организации, обеспечивая ресурсами, инфраструктурой, персоналом, данными и контролем (рис. 5).

Управление технологическим оборудованием и оснасткой регламентирует порядок и методологию управления технологическим оборудованием и оснасткой, оказывающими влияние на качество выпускаемой продукции.

Оборудование традиционно составляет значимую часть основных фондов предприятия и его обслуживание, и развитие требует значительных инвестиций, поэтому оно должно использоваться с максимальной эффективностью. Регулярный анализ эффективности оборудования позволяет не только контролировать эффективность работы имеющегося оборудования, но и постоянно её повышать. Выявлены основные процедуры СМК, подлежащие автоматизации в целях цифровизации бизнес-процесса управления технологическим оборудованием и оснасткой и разработки программного обеспечения, состоящего из следующих модулей:

- модуль планирования технологического обслуживания и ремонта;
- модуль предиктивной диагностики состояния технологического оборудования;
- модуль анализа эффективности использования оборудования.

Управление компетентностью персонала. Цифровизация процесса управления персоналом в СМК является ключевым компонентом, направленным на обеспечение того, чтобы сотрудники обладали необходимыми компетенциями, мотивацией и вовлеченностью для достижения целей организации.

Для повышения квалификации сотрудников и их компетентности в отношении требований к качеству следует автоматизировать процессы обучения, а также создавать и поддерживать базы знаний, необходимые для контроля уровня компетентности сотрудников предприятия.

Поскольку традиционные методы управления персоналом не всегда обладают гибкостью для учета индивидуальных потребностей и изменений в организационной структуре, внедрение автоматизированного подхода на базе цифровой платформы



Рис. 6. Структура цифрового инструментария по управлению компетентностью персонала
 Fig. 6. Structure of the digital toolkit for personnel competence management

позволит упростить систему и адаптироваться к новым условиям.

Главными модулями цифрового инструментария по управлению компетентностью персонала становятся (рис. 6):

- модуль разработки матриц компетентности персонала;
- модуль оценки компетентности персонала;
- модуль осведомленности персонала.

Управление инфраструктурой регламентирует порядок и методы управления объектами инфраструктуры, оказывающими влияние на качество

выпускаемой продукции. В процессе управления инфраструктурой используется многофункциональный подход для сбора входных данных от всех заинтересованных сторон.

Инфраструктура включает в себя:

- здания, сооружения, рабочее пространство и связанные с ним средства труда;
- технологическое оборудование и оснастки для процессов производства (как техническое, так и программное обеспечение);
- инженерные коммуникации;
- информационные системы (IT-инфраструктура);
- службы обеспечения (транспорт, связь).

Основными процедурами процесса являются (рис. 7):

- управление параметрами производственной среды;
- аудиты объектов инфраструктуры.

Управление ресурсами для мониторинга и измерений регламентирует порядок и методологию управления средствами контроля, измерения и мониторинга параметров качества продукции и процессов СМК.

Основными процедурами данного процесса являются:

- управление средствами контроля и средствами измерений;
- анализ измерительных систем.

Заключение

Разрабатываемый цифровой инструмент системы менеджмента качества предназначен для обеспечения устойчивого уровня качества выпускаемой продукции, оптимизации внутренних управленческих и производственных процессов машиностроительного предприятия, а также повышения эффективности выполнения бизнес-процессов, связанных с планированием, обеспечением, контролем и совершенствованием качества. Его применение



Рис. 7. Блок-схема процесса управления инфраструктурой
 Fig. 7. Block diagram of the infrastructure management process

позволит снизить трудоёмкость выполнения ключевых процедур, минимизировать риски, связанные с поставками комплектующих и сырья, а также позволит уменьшить влияние человеческого фактора на результаты деятельности предприятия.

Набор цифрового инструментария может быть быстро адаптирован к изменениям во внешней и внутренней среде, включая изменения в требованиях клиентов, регуляторных нормативах и технологических инновациях предприятия.

Список источников / References

1. Васильев В. А., Александрова С. В. Цифровые технологии в управлении качеством // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 10. С. 35–41. EDN: PFJOMJ.
1. Vasilyev V. A., Aleksandrova S. V. Tsifrovyye tekhnologii v upravlenii kachestvom [Digital technologies in quality management]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2020. Issue 10. P. 35–41. EDN: PFJOMJ. (In Russ.).
2. Васильев В. А., Александрова С. В., Александров М. Н. Интеграция менеджмента качества и цифровых технологий // Качество. Инновации. Образование. 2017. № 9 (148). С. 14–19. EDN: ZOKZXH.
2. Vasilyev V. A., Aleksandrova S. V., Aleksandrov M. N. Integratsiya menedzhmenta kachestva i tsifrovyykh tekhnologii [Integration of quality management and digital technologies]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye. Quality. Innovation. Education.* 2017. No. 9 (148). P. 14–19. EDN: ZOKZXH. (In Russ.).
3. Александрова С. В., Васильев В. А., Александров М. Н. Возможности цифровизации систем менеджмента качества // Качество. Инновации. Образование. 2021. № 1 (171). С. 17–21. DOI: 10.31145/1999-513x-2021-1-17-21. EDN: KOHCGE.
3. Aleksandrova S. V., Vasil'yev V. A., Aleksandrov M. N. Vozmozhnosti tsifrovizatsii sistem menedzhmenta kachestva [Opportunities for digitalization of quality management systems]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye. Quality. Innovation. Education.* 2021. No. 1 (171). P. 17–21. DOI: 10.31145/1999-513x-2021-1-17-21. EDN: KOHCGE. (In Russ.).
4. Ковригин Е. А., Васильев В. А. Пути развития СМК в условиях цифровизации // Компетентность. 2020. № 6. С. 12–17. EDN: ZUIYYP.
4. Kovrigin E. A., Vasilyev V. A. Puti razvitiya SMK v usloviyakh tsifrovizatsii [Ways of QMS development in digitalization]. *Kompetentnost'. Competency.* 2020. No. 6. P. 12–17. EDN: ZUIYYP. (In Russ.).
5. Frank A. G., Dalenogare L., Ayalaet N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics.* 2019. Vol. 210. P. 15–26. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.
6. Sony M., Antony J., Douglas J. A. Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: A narrative review of literature and future directions for research. *The TQM Journal.* 2020. Vol. 32, no. 4. P. 779–793. DOI: 10.1108/TQM-12-2019-0275.
7. Васильев В. А., Александрова С. В., Летучев Г. М. Цифровые технологии в управлении качеством // Идеи и инновации. 2022. Т. 10. С. 125–129. DOI: 10.48023/2411-7943_2022_10_1_2_125. EDN: DWESHO.
7. Vasilyev V. A., Aleksandrova S. V., Letuchev G. M. Tsifrovyye tekhnologii v upravlenii kachestvom [Digital technologies in quality management]. *Idey i innovatsii. Ideas and Innovations.* 2022. Vol. 10. P. 125–129. DOI: 10.48023/2411-7943_2022_10_1_2_125. EDN: DWESHO. (In Russ.).
8. Кудрявцева С. С., Матусевич И. Р., Халиулин Р. А. Технологии цифровизации СМК бизнес-процессов предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 4 (108). С. 37–41. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-4-37-41. EDN: TVPKQA.
8. Kudryavtseva S. S., Matusevich I. R., Khaliulin R. A. Tekhnologii tsifrovizatsii SMK biznes-protssessov predpriyatiya [Technology of digitalization of quality management systems of business processes of the enterprise]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2022. Vol. 24, no. 4 (108). P. 37–41. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-4-37-41. EDN: TVPKQA. (In Russ.).
9. Антипова О. И., Горохова Д. А. Подходы к цифровизации систем менеджмента качества // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 12. С. 106–109. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-106-107. EDN: NAXELQ.
9. Antipova O. I., Gorokhova D. A. Podkhody k tsifrovizatsii sistem menedzhmenta kachestva [Approaches to digitalization of quality management systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2023. Issue 12. P. 106–109. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-106-107. EDN: NAXELQ. (In Russ.).
10. Савич Е. К., Антипов Д. В. Структурная модель цифровой платформы системы менеджмента качества // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 10. С. 172–177. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-172-173. EDN: SKTLCI.
10. Savich E. K., Antipov D. V. Strukturnaya model' tsifrovoy platformy sistemy menedzhmenta kachestva [The structural model of the digital platform of the quality management system]. *Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2024. Issue 10. P. 172–177. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-172-173. EDN: SKTLCI. (In Russ.).
11. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015–11–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 49 с.
11. GOST R ISO 9001-2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality management systems. Requirements]. Moscow, 2020. 49 p. (In Russ.).
12. ГОСТ Р ИСО 9004-2019. Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации. Введ. 2020–10–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 56 с.
12. GOST R ISO 9004-2019. Menedzhment kachestva. Kachestvo organizatsii. Rukovodstvo po dostizheniyu ustoychivogo uspekha organizatsii [Quality management. Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success]. Moscow, 2019. 56 p. (In Russ.).
13. Савич Е. К., Антипов Д. В., Дмитриев Д. М. Программный модуль по предупреждению несоответствий по качеству продукции: программа для ЭВМ № 2024614070. Москва: ФИПС, 2024. Бюл. № 2.
13. Savich E. K., Antipov D. V., Dmitriyev D. M. Programmnyy modul' po preduprezhdeniyu nesootvetstviy po kachestvu produktsii: programma dlya EVM № 2024614070 [Software module for the prevention of product quality inconsistencies: a computer program No. 2024614070]. Moscow, 2024. Bull. No. 2. (In Russ.).
14. Савич Е. К., Антипов Д. В. Программное обеспечение управления рисками и отказами производственных процессов: программа для ЭВМ № 2023611365. Москва: ФИПС, 2023. Бюл. № 1.
14. Savich E. K., Antipov D. V. Programmnoye obespecheniye upravleniya riskami i otkazami proizvodstvennykh protsessov: programma dlya EVM № 2023611365 [Software for risk and failure management of production processes: computer program No. 2023611365]. Moscow, 2023. Bull. No. 1. (In Russ.).
15. Савич Е. К., Антипов Д. В., Дмитриев Д. М. Программный модуль по разработке плана управления качеством продукции и процессов: программа для ЭВМ № 2024613501. Москва: ФИПС, 2024. Бюл. № 2.
15. Savich E. K., Antipov D. V., Dmitriyev D. M. Programmnyy modul' po razrabotke plana upravleniya kachestvom produktsii i protsessov: programma dlya EVM № 2024613501. Moscow: ФИПС, 2024. Бюл. № 2.

Savich E. K., Antipov D. V., Dmitriyev D. M. Programmnuyu modul' po razrabotke plana upravleniya kachestvom produktsii i protsessov: programma dlya EVM № 2024613501 [Software module for developing a quality management plan for products and processes: computer program No. 2024613501]. Moscow, 2024. Bull. No. 2. (In Russ.).

16. Савич Е. К., Антипов Д. В., Дмитриев Д. М. Программный модуль проектирования потока процесса: программа для ЭВМ № 2024613623. Москва: ФИПС, 2024. Бюл. № 2.

Savich E. K., Antipov D. V., Dmitriyev D. M. Programmnuyu modul' po razrabotke plana upravleniya kachestvom produktsii i protsessov: programma dlya EVM № 2024613623 [Process flow design software module: computer program No. 2024613623]. Moscow, 2024. Bull. No. 2. (In Russ.).

САВИЧ Екатерина Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева, г. Самара.
SPIN-код: 3826-7898
AuthorID (РИНЦ): 609270
ORCID: 0000-0002-5515-7799
AuthorID (SCOPUS): 57204666133
Адрес для переписки: savich.ek@ssau.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 25.02.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.

SAVICH Ekaterina Konstantinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering, Samara National Research University, Samara.
SPIN-code: 3826-7898
AuthorID (RSCI): 609270
ORCID: 0000-0002-5515-7799
AuthorID (SCOPUS): 57204666133
Correspondence address: savich.ek@ssau.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 25.02.2025; approved after reviewing 16.05.2025; accepted for publication 25.06.2025.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЭТАПЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

К. А. Бражникова¹, Е. К. Савич²

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, г. Самара

Исследована структурная модель процесса научного исследования на примере процессов физико-математического и физического моделирования тепло- и массообмена при создании бортовой системы газификации жидких компонентов ракетного топлива в баках отработавших ступеней ракет-носителей. Приведены методические рекомендации оценки качества процесса научного исследования, содержащие перечень критериев качества на этапе научно-исследовательских работ, включающих определенную структуру единичных показателей. Предложена структура комплексной оценки качества процесса исследования, а также блок-схемы проведения процесса физико-математического и физического моделирования с учетом введенных критериев качества, позволяющие повысить достоверность получаемых результатов с наименьшими затратами труда, времени, финансовых и материально-технических ресурсов.

Представленные материалы могут быть положены в основу универсального подхода оценки качества процесса научного исследования при решении широкого круга исследовательских задач, например, тепло- и массообмена, динамики, баллистики, программирования сложных алгоритмов и т.д.

Ключевые слова: качество, исследование, процесс, критерии, достоверность, риски, оценка.

Для цитирования: Бражникова К. А., Савич Е. К. Оценка качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 27–33. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-27-33. EDN: WFYERG.



© Бражникова К. А., Савич Е. К., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE RESEARCH PROCESS AT THE STAGE OF SCIENTIFIC STUDIES

K. A. Brazhnikova¹, E. K. Savich²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Samara National Research University, Samara, Russia

The structural model of the scientific research process is investigated on the example of the processes of physical-mathematical and physical modeling of heat and mass transfer when creating an on-board system of gasification of liquid components of rocket fuel in the tanks of spent stages of launch vehicles. Methodical recommendations for assessing the quality of the scientific research process are given, containing a list of quality criteria at the stage of research work, including a certain structure of single indicators. The structure of the complex quality assessment of the research process is proposed, as well as block diagrams of the physical-mathematical and physical modeling process, taking into account the introduced quality criteria, allowing to increase the reliability of the obtained results with the least expenditure of labor, time, financial and material-technical resources.

The presented materials can be used as a basis for a universal approach to assess the quality of the scientific research process in solving a wide range of research problems, for example, heat and mass transfer, dynamics, ballistics, programming of complex algorithms, etc.

Keywords: quality, research, process, criteria, reliability, risks, evaluation.



Введение

В различных открытых источниках на сегодняшний день по вопросу управления проектом представлены различные концепции и подходы, которые охватывают различные отрасли промышленности. Существующая теоретическая база по обеспечению, улучшению и оценке качества проектных разработок, реализованная в нормативно-технической документации, включает в себя комплексы действий и инструментов, направленных на совершенствование системы управления проектами, обеспечение требуемого качества технологического проектирования, минимизацию ошибок в оценке показателей и характеристик изделий, повышение адекватности оценки конструктивно-технологических решений, что в конечном итоге позволяет получить на выходе опытно-конструкторских работ сложную техническую систему, отвечающую предъявляемым требованиям.

Однако при создании перспективной сложной технической системы, не имеющей прототипов, требуется разработка соответствующих новых методов для определения ее проектно-конструкторских, схемных и технологических параметров. Что, в свою очередь, ведет к решению проблемы обеспечения качества процесса исследований на этапе научно-исследовательских работ.

Таким образом, формирование целостной системы обеспечения и управления качеством научно-технических проектов в области создания перспективных сложных технических систем рассматривается как самостоятельное прикладное направление с расширением границ управления качеством, в основу которой ложится наработанная теоретическая база, включающая в том числе и методики оценки качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ.

В управлении качеством при реализации научно-технического проекта требования предъявляются как к качеству самой проектируемой сложной технической системы, так и к качеству процессов внутри проекта на всех этапах жизненного цикла [1, 2], в том числе и на этапе проведения научно-исследовательских работ в процессе создания новых перспективных ракетно-космических систем [3].

Поскольку в процессе научных исследований задействован человеческий фактор, нельзя быть уверенным на 100 % в результате процесса. Человеку свойственно ошибаться, и необходимо учитывать этот факт.

Тщательное планирование процесса научных исследований и использование универсального подхода оценки качества процесса научного исследования при решении различных исследовательских задач позволяют повысить качество данного процесса, а именно получить на выходе достоверные и объективные научно-технические результаты с наименьшими затратами труда, времени, финансовых и материально-технических ресурсов [4, 5].

Научные исследования включают в себя разработку физико-математической и физической

моделей, программ экспериментов и результаты их реализации в виде соответствующих методик. Чем выше качество процесса исследования сложной технической системы, тем более высоким является достоверное описание всех этапов научно-исследовательской работы, качество результатов теоретико-экспериментальных исследований, и вероятность ошибочных проектных решений сводится к минимуму.

Управление качеством проекта, как часть менеджмента качества, ориентировано на получение качественно нового результата и обеспечение инновационного прорыва. Применение процессного подхода в цикле создания на этапе научно-исследовательских работ позволяет на выходе представить достоверную научно-техническую продукцию, которая, в свою очередь, является входом этапа опытно-конструкторских работ для формирования тактико-технических характеристик сложной технической системы.

Реализация цикла PDCA (Plan-Do-Check-Act — планирование-действие-проверка-корректировка) на этапе научно-исследовательских работ имеет следующие стадии:

1. Планирование (P) — раскрытие проблемы, нахождение путей решения проблемы, методическое обеспечение качества теоретико-экспериментальных исследований на основе введения процессов валидации и верификации расчетных и экспериментальных исследований, распределение необходимых ресурсов.

2. Выполнение (D) — осуществление процесса исследований на этапе научно-исследовательских работ на основе методического обеспечения качества.

3. Проверка (C) — сбор информации, обработка полученных результатов математического и физического моделирования.

4. Воздействие (A) — принятие решения о разработке или усовершенствовании сопровождающей научно-технической документации или перепланировании.

Цикл SDCA (Standart-Do-Check-Act) [6] обеспечивает текущий процесс научных исследований, контролирует отклонения в качестве данного процесса — отклонение от действующего сопровождающей научно-технической документации. Если возникает необходимость в изменении существующей сопровождающей нормативно-технической документации или в разработке новой, то включается цикл PDCA. Реальная деятельность осуществляется на стадии D как цикла PDCA, так и цикла SDCA. Следовательно, процесс исследований на этапе научно-исследовательских работ должен переходить от цикла SDCA к циклу PDCA и обратно.

Постановка задачи

Целью проводимого исследования является повышение качества процесса исследования процесса моделирования тепло- и массообмена на этапе научно-исследовательской работы на примере создания

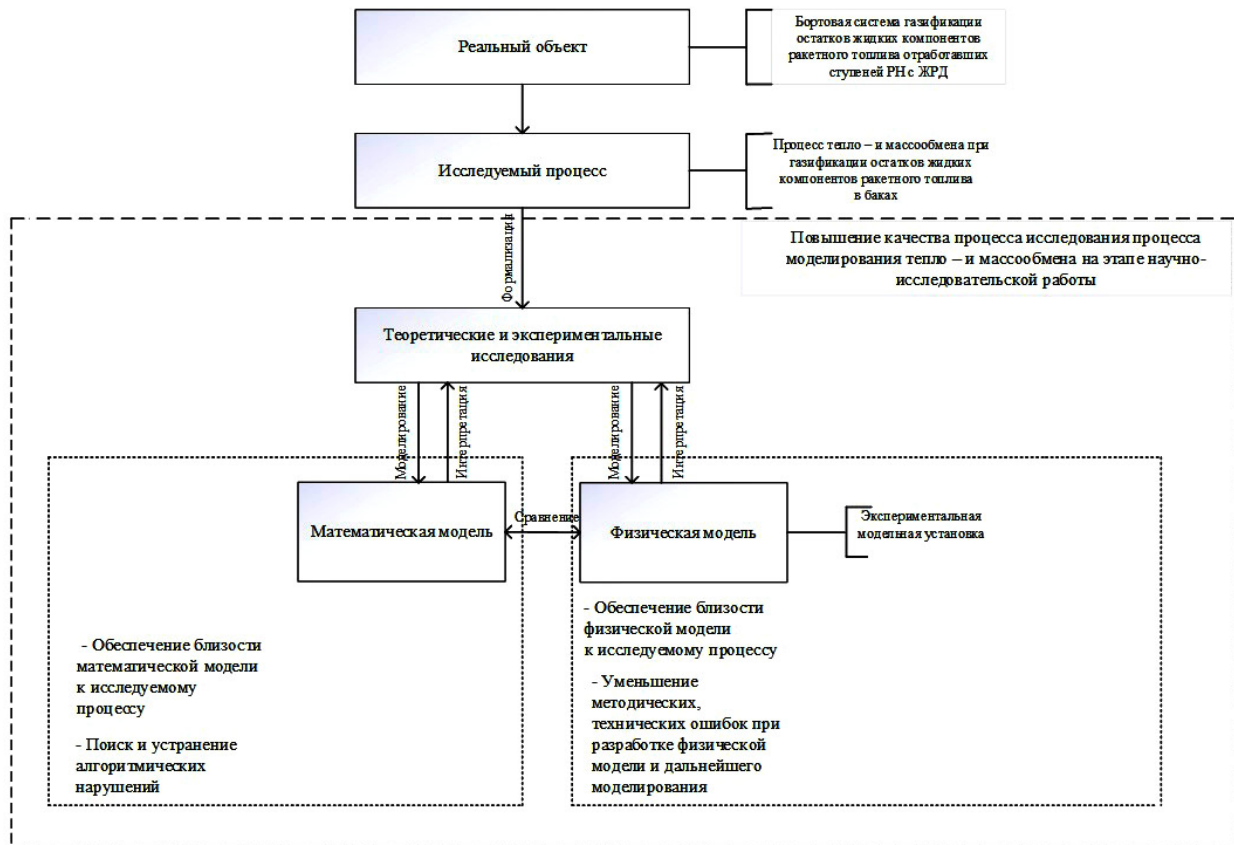


Рис. 1. Структурная модель процесса исследования процесса тепло- и массообмена
 Fig. 1. Structural model of the research process of the heat and mass transfer

бортовой системы газификации жидких компонентов ракетного топлива в баках отработавших ступеней ракет-носителей (РН) с жидкостным ракетным двигателем (ЖРД). Соответственно, это предусматривает решение следующих задач [7]:

- 1) исследовать и представить структурную модель процесса исследования;
- 2) разработать методические рекомендации оценки качества процесса исследования, содержащие:
 - единичные показатели качества процесса исследования;
 - критерии качества процесса исследования;
 - структуру комплексной оценки качества процесса исследования;
 - блок-схемы проведения процесса физико-математического и физического моделирования с учетом введенных критериев качества.

Методические рекомендации оценки качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ

В соответствии с [8] с целью управления процессом исследования и результативного принятия решений важно оценивать показатели процесса исследования путем сравнения выходных данных с введенными критериями, оценивать риски и возможности, связанные с процессом исследования на этапе научно-исследовательской работы. Качество в приложении к исследуемой проблеме есть степень соответствия физико-математической и физической моделей исследуемого процесса реальному физическому процессу.

Структурная модель процесса исследования процесса моделирования тепло- и массообмена включает в себя части процесса исследования

и связи между ними. Данные связи представляют собой определенную информацию, получаемую в результате моделирования и интерпретации. Структурная модель процесса исследования представлена на рис. 1.

Для объективной комплексной оценки качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ необходимо сформировать показатели качества и на основе выполненного анализа структуры и содержания исследовательской деятельности выделить характеристики исследования, которые могут стать критериями оценивания научно-исследовательской работы.

Критерии качества теоретико-экспериментальных исследований — это правило, на основании которого формируется оценка качества процесса теоретико-экспериментальных исследований.

Совокупность критериев качества теоретико-экспериментальных исследований должна отражать с достаточной полнотой все наиболее существенные характеристики процесса. В данной работе в приложении к исследуемой проблеме основным критерием качества теоретико-экспериментальных исследований является достоверность получаемых результатов моделирования.

Показатели качества исследуемого процесса — это количественная характеристика исследуемых параметров процесса.

На этапе научно-исследовательских работ формирование номенклатуры показателей качества процесса исследований осуществляется путем сбора и анализа исходной информации о процессе, в ходе чего используются открытые данные из научно-технической документации, научных отчетов о прикладных научно-исследовательских работах, результаты патентных исследований, а также тре-

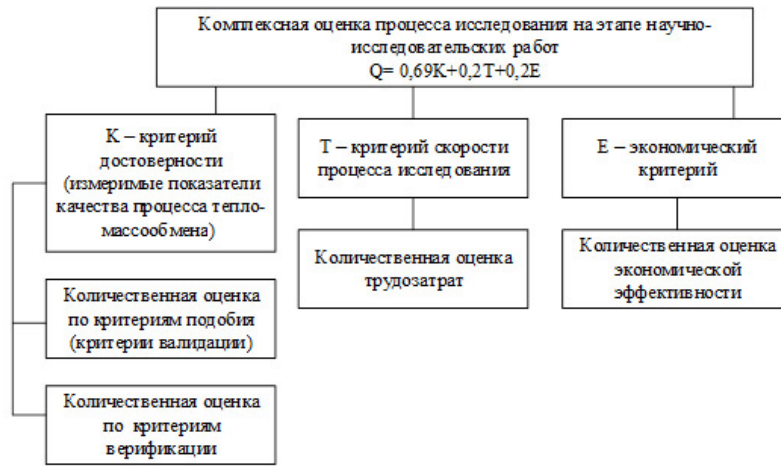


Рис. 2. Структура комплексной оценки качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ
 Fig. 2. Structure of comprehensive assessment of the quality of the research process at the stage of scientific studies

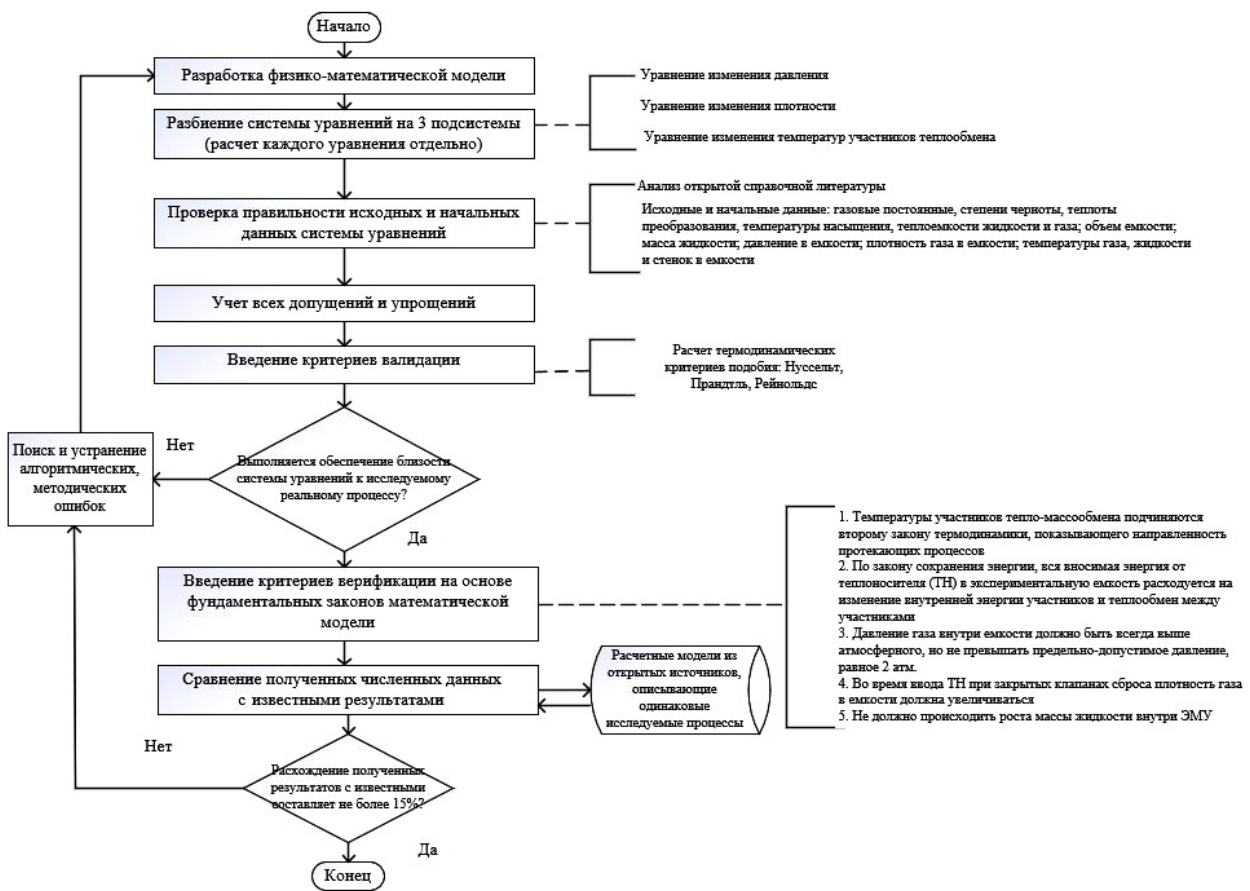


Рис. 3. Блок-схема методики проведения процесса исследования при физико-математическом моделировании
 Fig. 3. Block diagram of the methodology of the research process in physical and mathematical modeling

бования международных, национальных, отраслевых стандартов, результаты соответствующих испытаний и т.д.

Оценивание качества процесса исследования основывается на анализе изменений значений соответствующих показателей качества, оценке сроков реализации процесса и снижении затрат используемых ресурсов.

Комплексный и единичные показатели могут быть рассмотрены в разрезе процессов, входящих

в структурную модель исследования процесса моделирования тепло- и массообмена.

К основным единичным показателям качества процесса исследования процесса тепло- и массообмена при газификации остатков жидких компонентов ракетного топлива относятся:

- 1) температура участников теплообмена;
- 2) влажность воздуха внутри экспериментальной модельной установки (уменьшенная физическая модель топливного бака, далее ЭМУ);

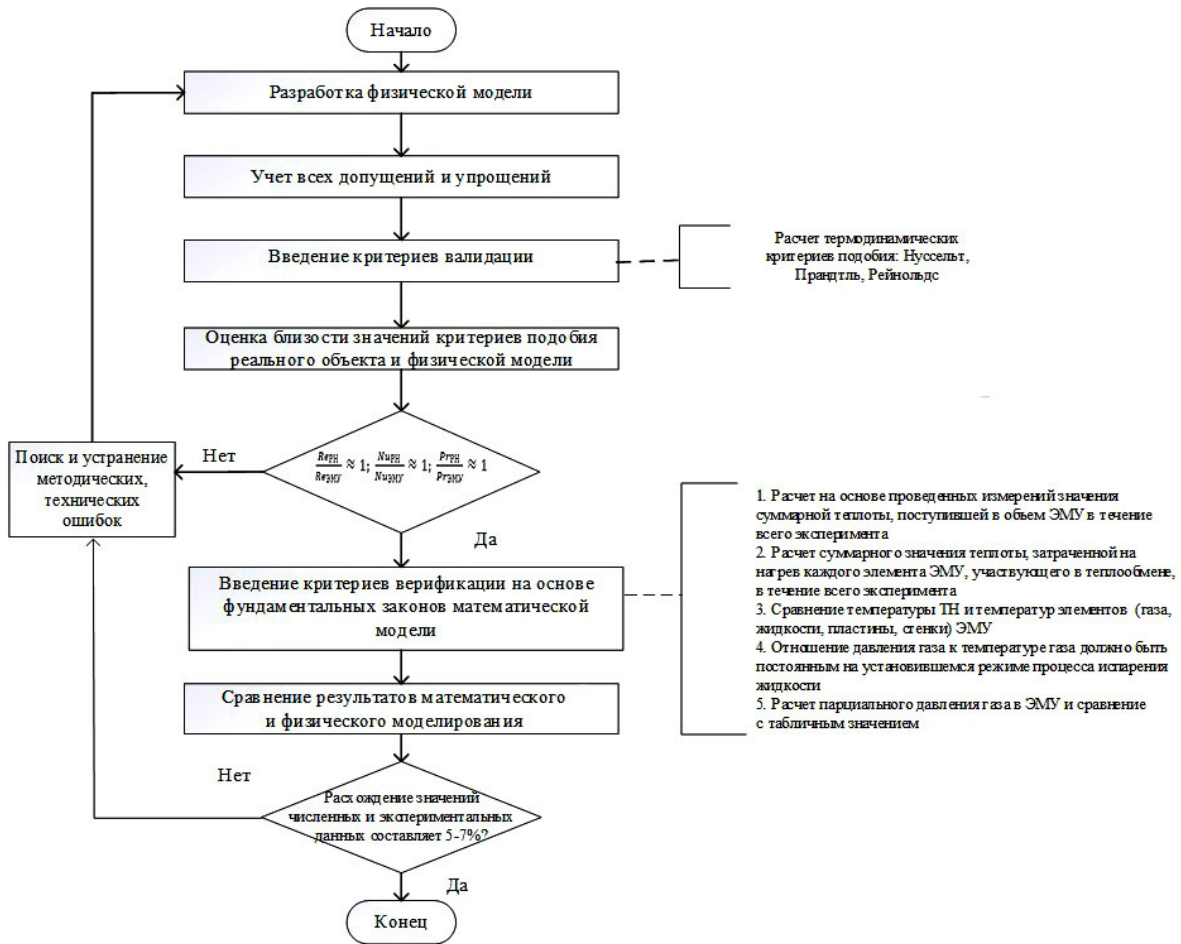


Рис. 4. Блок-схема методики проведения процесса исследования при физическом моделировании
 Fig. 4. Block diagram of the research process of the heat and mass transfer

- 3) площадь поверхности испаряемой жидкости в ЭМУ;
- 4) давление в ЭМУ;
- 5) критерии подобия;
- 6) производительность труда;
- 7) стоимость процесса (снижение затрат используемых ресурсов);
- 8) скорость процесса;
- 9) показатели, характеризующие факторы риска.

Выявленные единичные показатели качества процесса исследования можно объединить в три группы:

I. Временные показатели — показатель 8.

II. Показатели достоверности — измеримые показатели качества процесса тепло- и массообмена — показатели 1, 2, 3, 4, 5.

III. Экономические показатели — показатели 6, 7.

Очевидно, что определяющими показателями качества, по которым принимается решение по оценке качества процесса исследования в целом — показатели достоверности — измеримые показатели качества процесса тепло- и массообмена — показатели 1, 2, 3, 4, 5.

С учетом вышеизложенного в общем виде комплексная оценка процесса исследования Q представляется в виде единой формулы, включающей основные критерии качества теоретико-экспериментальных исследований, имеющих определенные удельные веса:

$$Q = 0,69K + 0,2T + 0,2E, \quad (1)$$

Таблица 1. Вероятность возникновения риска
 Table 1. Probability of risk occurrence

Вид события	Вероятность возникновения риска	
	Количественное описание	Качественное описание
Слабовероятное	0,1	Шансы наступления события минимальны
Маловероятное	0,3	Событие может произойти в исключительных случаях
Вероятное	0,5	Наличие свидетельств, достаточных для предположения возможности события
Почти возможное	0,7	Событие может произойти
Возможное	0,9	Событие, как и ожидалось, произойдет

где K — критерий достоверности (количественная оценка); T — критерий скорости процесса исследования (количественная оценка); E — экономический критерий (количественная оценка).

На рис. 2 представлена структура комплексной оценки качества процесса исследования на этапе научно-исследовательских работ.

Более подробно на рис. 3 и 4 рассмотрены группы процессов и их последовательность на этапах физического и физико-математического моделирования, входящих в структурную модель исследова-

Таблица 2. Последствия от наступления риска
 Table 2. Consequences of risk occurrence

Вид последствий	Величина последствий	
	Количественное описание	Качественное описание
Минимальные	0,1	Требования ТЗ (ТТЗ) выполняются в заявленном объеме
Низкие	0,3	Требования ТЗ (ТТЗ) выполнены с небольшим отклонением
Средние	0,5	Требования ТЗ (ТТЗ) выполнены с отклонениями, согласованными с заказчиком
Высокие	0,7	Требования ТЗ (ТТЗ) выполнены частично в отношении заявленного объема
Максимальные	0,9	Невыполнение требований ТЗ (ТТЗ)

Вероятность	Ранг риска					
	0,9	0,09	0,27	0,45	0,63	0,81
	0,7	0,07	0,21	0,35	0,49	0,63
	0,5	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
	0,3	0,03	0,09	0,15	0,21	0,27
	0,1	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	
	Последствия					

Рис. 5. Матрица качественной оценки рисков
 Fig. 5. Matrix of qualitative risk assessment

ния процесса тепло- и массообмена с точки зрения управления качеством.

Предлагается декомпозиция исследуемой научно-технической задачи с последующим разбиением на самостоятельные блоки как внутри процесса исследования при физико-математическом моделировании, так и внутри процесса исследования при физическом моделировании, включающие последовательную проверку результатов моделирования путем введения критериев достоверности, охватывающих совокупность показателей, служащих средством оценивания и накопления количественных данных для критериального обобщения.

При управлении научно-техническим проектом отдельно рассмотрим показатели, характеризующие факторы риска на этапе научно-исследовательских работ, адаптируя требования нормативно-технической документации в соответствии с видом и спецификой проекта [9, 10].

Среди известных методов для оценки рисков на этапе научно-исследовательских работ выбрана матрица последствий и вероятностей. В матрице последствий и вероятностей определены комбинации числовых значений вероятности наступления риска (табл. 1) и последствия от его наступления (табл. 2), при умножении которых можно определить ранг риска (рис. 5):

- низкий (ранг от 0,01 до 0,08);
- средний (ранг от 0,09 до 0,44);
- высокий (ранг от 0,45) — выделенная серая зона.

При реализации проекта на этапе научно-исследовательских работ в перечень рисков входят научно-технические риски, влияющие непосредственно на выполнение сетевого плана-графика, изменение сроков выполнения проектов, достоверность получаемых результатов при проведении физико-математического и физического моделирования, достижимость заявленных результатов проекта, что может привести в итоге к возврату полученного финансирования проекта. Например, к таким рискам относятся нарушения в ходе проведения физического моделирования, что требует проведения расширенных исследований с целью выявления новых методических подходов в повышении качества экспериментальных исследований.

Данный риск имеет высокий ранг (серая зона), что приводит к высокой тяжести последствий его наступления.

С точки зрения управления качеством научно-технического проекта, для повышения качества процесса исследований и снижения уровня научно-технических рисков (например, нарушения в ходе проведения процесса моделирования) на этапе научно-исследовательских работ необходимо руководствоваться разработанной методикой проведения процесса исследования процесса моделирования тепло- и массообмена, позволяющей за счет введения в соответствующие места схемы процесса моделирования сформулированных критериев валидации и верификации, определяющие показатели качества, по которым принимается решение по оценке качества процесса исследования в целом [11].

В свою очередь это позволит своевременно выявить алгоритмические, методические, технические и иные ошибки, возникающие в процессе моделирования, а также выработать корректирующие и предупреждающие действия.

Таким образом, как видно из приведенных групп процессов и их последовательности на этапах физического и физико-математического моделирования, входящих в структурную модель исследования процесса тепло- и массообмена, качество научно-технических результатов ложится в основу управления качеством проекта.

Выводы

1. Исследована структурная модель процесса научного исследования на примере процессов физико-математического и физического моделирования тепло- и массообмена при создании бортовой системы газификации жидких компонентов ракетного топлива в баках отработавших ступеней ракет-носителей.

2. Приведены методические рекомендации оценки качества, содержащие структуру комплексной оценки качества исследования на этапе научно-исследовательских работ, перечень критериев качества, отражающих наиболее существенные характеристики исследуемого процесса.

3. Приведены блок-схемы проведения процесса физико-математического и физического моделирования с учетом введенных критериев качества, позволяющие повысить достоверность получаемых результатов с наименьшими затратами труда, времени, финансовых и материально-технических ресурсов.

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015–11–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 49 с.

GOST R ISO 9001-2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality management systems. Requirements]. Moscow, 2020. 49 p. (In Russ.).

2. ГОСТ Р ИСО 10006-2019. Менеджмент качества. Руководящие указания по менеджменту качества в проектах. Введ. 2020–10–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 32 с.

GOST R ISO 10006-2019. Menedzhment kachestva. Rukovodyashchiye ukazaniya po menedzhmentu kachestva v proyektakh [Quality management. Guidelines for quality management in projects]. Moscow, 2019. 32 p. (In Russ.).

3. Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов: РК-11-КТ: утв. и введ. в действие Приказом Роскосмоса от 22 дек. 2011 г. № 232. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

Polozheniye o poryadke sozdaniya, proizvodstva i ekspluatatsii (primeneniya) raketnykh i kosmicheskikh kompleksov RK-11-KT [Regulation on the procedure for the creation, production and operation (use) of rocket and space complexes: RK-11-KT]: approved and enacted by Order of Roscosmos of December 22, 2011. No. 232. Available at ConsultantPlus. (In Russ.).

4. Культин Н. Б., Сурина А. В. Управление инновационными проектами и процессами: моногр. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2025. 279 с. DOI: 10.18720/SPBPU/5/tr25-87.

Kultin N. B., Surina A. V. Upravleniye innovatsionnymi proyektami i protsessami [Management of innovative projects and processes]. Saint Petersburg, 2025. 279 p. DOI: 10.18720/SPBPU/5/tr25-87. (In Russ.).

5. Куркова О. П. Организация и планирование научно-технических исследований и разработок: моногр. Санкт-Петербург: Научное издание, 2018. 245 с. ISBN 978-5-6040965-2-9. EDN: YXJEJX.

Kurkova O. P. Organizatsiya i planirovaniye nauchno-tekhnicheskikh issledovaniy i razrabotok [Organisation and planning of scientific and technical research and development]. Saint Petersburg, 2018. 245 p. ISBN 978-5-6040965-2-9. EDN: YXJEJX. (In Russ.).

6. Жемчугов А. М., Жемчугов М. К. Цикл PDCA Деминга. Современное развитие // Проблемы экономики и менеджмента. 2016. № 2 (54). С. 3–28. EDN: VMDSTV.

Zhemchugov A. M., Zhemchugov M. K. Tsikl PDCA Deminga. Sovremennoye razvitiye [PDCA Cycle Deming. Current development]. *Problemy Ekonomiki i Menedzhmenta*. 2016. No. 2 (54). P. 3–28. EDN: VMDSTV. (In Russ.).

7. Trushlyakov V. I., Rozhaeva K. A. Developing a Test Stand to Verify Accuracy of Conducted Research at the Early Design Stages of Active Descent Systems of Spent Launcher Stages. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9 (36). P. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i36/102037.

8. ГОСТ Р ИСО 9004-2019 Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации. Введ. 2020–10–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 56 с.

GOST R ISO 9004-2019. Menedzhment kachestva. Kachestvo organizatsii. Rukovodstvo po dostizheniyu ustoychivogo uspekha organizatsii [Quality management. Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success]. Moscow, 2019. 56 p. (In Russ.).

9. ГОСТ Р ИСО 17666-2021. Менеджмент риска. Космические системы. Введ. 2022–03–01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 20 с.

GOST R ISO 17666-2021. Menedzhment riska. Kosmicheskiye sistemy [Risk management – Space systems]. Moscow, 2021. 20 p. (In Russ.).

10. ГОСТ Р 52806-2007. Менеджмент рисков проектов. Общие положения. Введ. 2010–01–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 20 с.

GOST R 52806-2007. Menedzhment riskov proyektov. Obshchiye polozheniya [Project risk management. General]. Moscow, 2020. 20 p. (In Russ.).

11. Brazhnikova K. Improving the quality of modeling thermodynamic processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2182. 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012044. EDN: CDBZCL.

БРАЗНИКОВА Ксения Алексеевна, научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Парогазовые смеси в конструкциях ракет-носителей» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4515-1818

AuthorID (РИНЦ): 689057

ORCID: 0000-0002-5393-9172

AuthorID (SCOPUS): 57192071067

Адрес для переписки: kabrazhnikova@omgtu.ru.

САВИЧ Екатерина Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева, г. Самара.

SPIN-код: 3826-7898

AuthorID (РИНЦ): 609270

ORCID: 0000-0002-5515-7799

AuthorID (SCOPUS): 57204666133

Адрес для переписки: savich.ek@ssau.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 28.02.2025; одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

BRAZHNIKOVA Kseniya Alekseevna, Research Associate at the Scientific Research Laboratory "Steam-gas Mixtures in Launch Vehicle Designs", Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4515-1818

AuthorID (RSCI): 689057

ORCID: 0000-0002-5393-9172

AuthorID (SCOPUS): 57192071067

Correspondence address: kabrazhnikova@omgtu.ru

SAVICH Ekaterina Konstantinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering Department, Samara National Research University, Samara.

SPIN-code: 3826-7898

AuthorID (RSCI): 609270

ORCID: 0000-0002-5515-7799

AuthorID (SCOPUS): 57204666133

Correspondence address: savich.ek@ssau.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 28.02.2025; approved after reviewing 16.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.



УДК/UDC 621.311:622.276

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-34-43

EDN: NVRKNK

Научная статья / Original article

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

А. И. Антонов, Д. Ю. Руди

Омский институт водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск

Тенденция развития промышленных объектов непосредственно связана с внедрением в системы электроснабжения различных полупроводниковых преобразователей. Однако актуальным остается вопрос влияния данных преобразователей на качество электроэнергии. Энергоустановки индукционного нагрева, в состав которых входит тиристорный преобразователь частоты, могут стать причиной появления гармонических искажений.

В статье представлен активный эксперимент на выбранном объекте исследования с нелинейной нагрузкой. Разработана математическая модель для исследования влияния нелинейной нагрузки на качество электрической энергии при различных параметрах электрической сети. С помощью программы для ЭВМ обработаны результаты эксперимента и проведен анализ результатов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, моделирование, приёмники электроэнергии, установки индукционного нагрева, несинусоидальность напряжений, гармонические искажения.

Для цитирования: Антонов А. И., Руди Д. Ю. Имитационное моделирование нелинейных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 34–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-34-43. EDN: NVRKNK.



© Антонов А. И., Руди Д. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION MODELLING OF NONLINEAR MODES OF ELECTRIC NETWORK OPERATION AND PROCESSING OF RESULTS USING A COMPUTER PROGRAM

A. I. Antonov, D. Yu. Rudi

Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University Water Transport, Omsk, Russia

The trend of industrial facilities development is directly related to the introduction of various semiconductor converters into power supply systems. However, the issue of influence of these converters on the quality of electric power remains relevant. Power installations of induction heating, which include thyristor frequency converter, can cause the appearance of harmonic distortions. The paper presents an active experiment on a selected object of study with a nonlinear load. This developed model is designed to determine the indicators of power quality caused by the operation of nonlinear load. The model allows carrying out studies of the influence of nonlinear load on the quality of electrical energy at different parameters of the electrical network. The results of the experiment are processed using a computer program and the analysis of data processing of the results is carried out.

Keywords: power quality, modeling, power receivers, induction heating units, voltage non-sinusoidality, harmonic distortions.



Введение

В последнее время наблюдается ухудшение качества электроэнергии (КЭЭ) в электрических сетях промышленных и непромышленных потребителей [1–4].

Проблема снижения КЭЭ возникает при разнообразных нарушениях их нормального функционирования [1, 2]. Стремительное развитие электрооборудования и его широкое применение в разных отраслях (сырьевой, перерабатывающей, машиностроительной, металлургической и т.д.) приводит к развитию промышленных предприятий. Внедрение современных, высокоэффективных технологических установок, особенно тех, что используют полупроводниковые преобразователи, негативно влияет на качество электроэнергии в электроэнергетических системах. Наиболее серьезная проблема — это несинусоидальность напряжения [5].

Появление гармонических колебаний, составляющих спектр напряжения, тесно связано с применением электроприёмников с нелинейными вольт-амперными характеристиками (ВАХ). Данное электрическое оборудование потребляет ток несинусоидальной формы, который, в свою очередь, искажает синусоиду питающего напряжения. В связи с этим оборудование с нелинейными ВАХ является генератором высших гармоник тока [4–6]. Токи гармонических искажений генерируются нагрузкой как результат преобразования части энергии основной частоты. Они протекают по электрической сети через сопротивление источника и далее — по всем ветвям нагрузки, в результате чего гармонические напряжения появляются на всех элементах электрической цепи.

Цель — разработать имитационную модель объекта исследования в программном продукте Matlab

SimPowerSystem и проанализировать электромагнитную обстановку в исследуемой электрической сети.

Задачи:

- исследовать проблему влияния тиристорных преобразователей частоты на элементы электрической сети;
- построить имитационную модель объекта исследования;
- на основе разработанной модели проанализировать электромагнитную обстановку.

Основная часть

В современных промышленных предприятиях различного назначения широко используется электрическая энергия уже в преобразованном виде. Применение нелинейных электрических потребителей (вентильные преобразователи, преобразователи частоты различного типа, дуговые сталеплавильные печи, электросварочные установки, установки индукционного нагрева, освещения, бытовая и офисная техника) привело к тому, что значительно ухудшилось качество электроэнергии в электроэнергетических системах общего назначения [4, 5, 7–13].

Объектом исследования является электроустановка индукционного нагрева, в состав которой входит тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ), электрическая схема которого представлена на рис. 1. ТПЧ построен по схеме двухзвенного преобразователя частоты со звеном постоянного тока [14].

Вентильные преобразователи в электрических сетях представляют собой генераторы спектров гармонических составляющих тока и напряжения [15], что, в свою очередь, негативно влияет на электрическую сеть переменного тока (дополнитель-

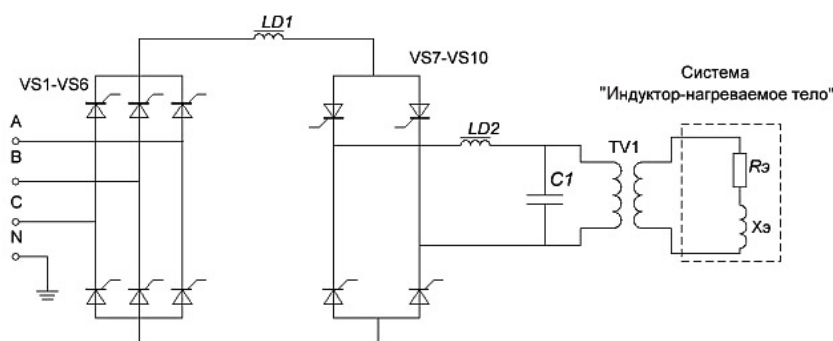


Рис. 1. Укрупненная принципиальная схема тиристорного преобразователя частоты: VS1-VS6 — выпрямитель; LD1-LD2 — сглаживающий реактор; VS7-VS10 — инвертор; C1 — батарея конденсаторов; RЭ, XЭ — эквивалентное активное и реактивное сопротивление системы «индуктор — нагреваемое тело»; TV1 — закалочный трансформатор [14]

Fig. 1. Enlarged schematic diagram of the thyristor frequency converter: VS1-VS6 — rectifier; LD1-LD2 — smoothing reactor; VS7-VS10 — inverter; C1 — capacitor bank; RЭ, XЭ — equivalent active and reactive resistance of the “inductor — heated body” system; TV1 — hardening transformer [14]

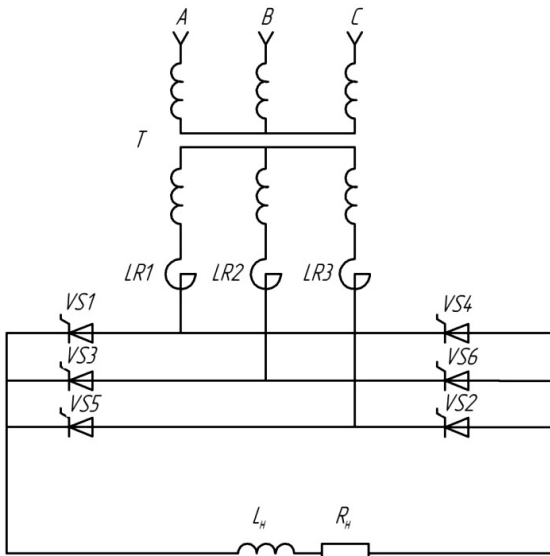


Рис. 2. Схема управления мостового управляемого выпрямителя
 Fig. 2. Control circuit of a bridge controlled rectifier

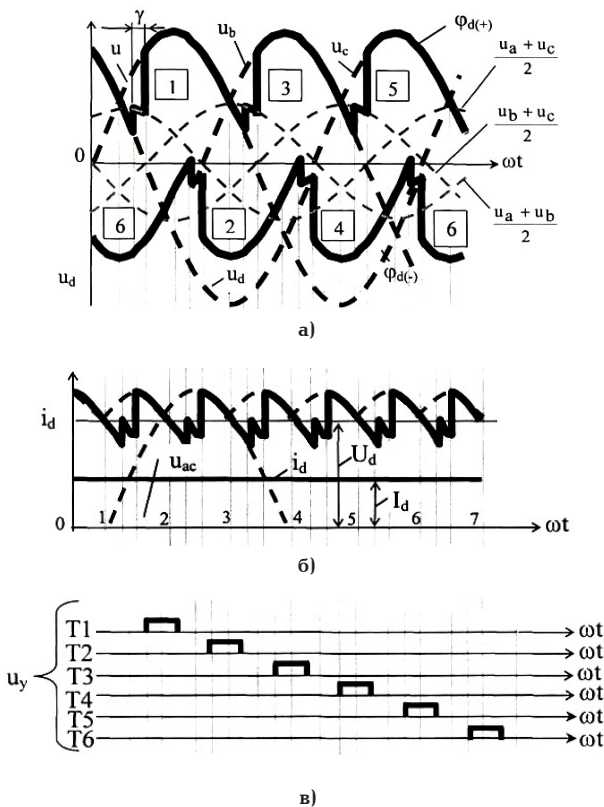


Рис. 3. Временные диаграммы токов и напряжений управляемого трехфазного мостового выпрямителя: а — диаграмма напряжений, б — диаграмма токов; в — импульсы отпирания тиристоров
 Fig. 3. Timing diagrams of currents and voltages of a controlled three-phase bridge rectifier: а — voltage diagram; б — current diagram; в — thyristor triggering pulses

ные потери мощности и нагрев) [16–18]. Данные электрические потери образуются в передающей электрической сети и в силовых трансформаторах. Падение напряжения от высших гармоник создает несинусоидальность напряжения, что неблагоприятно влияет на режимы работы промышленных и бытовых электропотребителей.

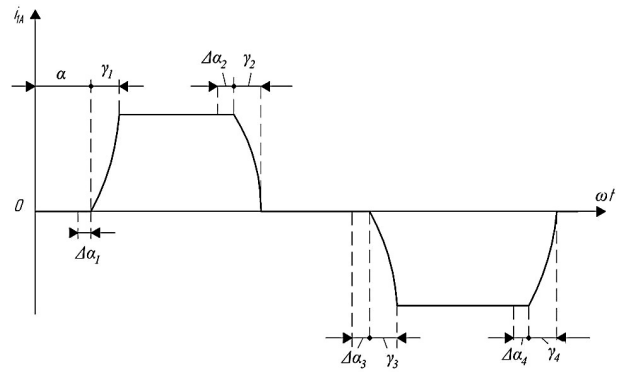


Рис. 4. Влияние асимметрии управляющих импульсов на форму выпрямленного тока
 Fig. 4. Influence of control pulse asymmetry on the shape of the rectified current

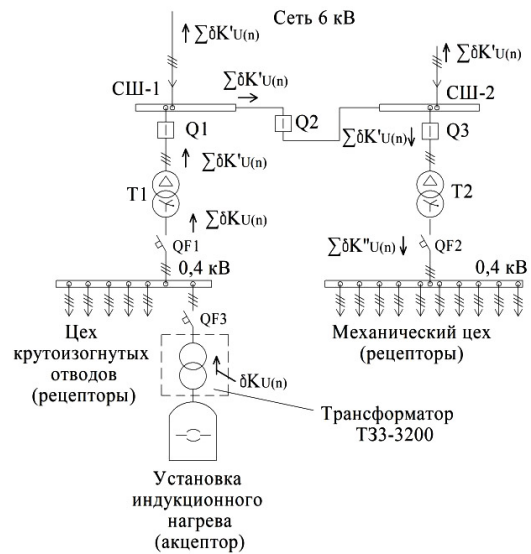


Рис. 5. Электрическая схема объекта исследования
 Fig. 5. Electrical diagram of the research object

В управляемых вентильных преобразователях чаще всего используются трехфазные мостовые схемы (рис. 2). Их работа характеризуется задержкой на угол α момента отпирания очередных тиристоров относительно точек естественного включения 1, 2, 3, 4, 5, 6 и т. д. (рис. 3а). Таким образом, отпирание импульсы u_y подаются на тиристоры T1–T6 (рис. 3в) с задержкой на угол α , определяемой системой управления выпрямителем [19].

Когда углы управления отдельных тиристоров T1–T6 имеют одинаковые значения α , то осуществляется симметричный способ управления выпрямителей. В таких условиях гармонические составляющие напряжения значительно меньше первой (основной) гармоники, поэтому при исследованиях ими пренебрегают [19, 20].

Однако возможен и несимметричный режим управления выпрямителем. В этом случае углы управления α_i отличаются от заданного значения α на величину ошибки $\Delta\alpha_i$ (рис. 4). Наличие такой ошибки приводит к увеличению угла сдвига, что негативно влияет на синусоидную форму напряжения [15].

В связи с этим предполагается, что при проведении исследования на разработанной имитационной модели в программе Matlab возможно обнаружить наличие превышения предельных значений выс-

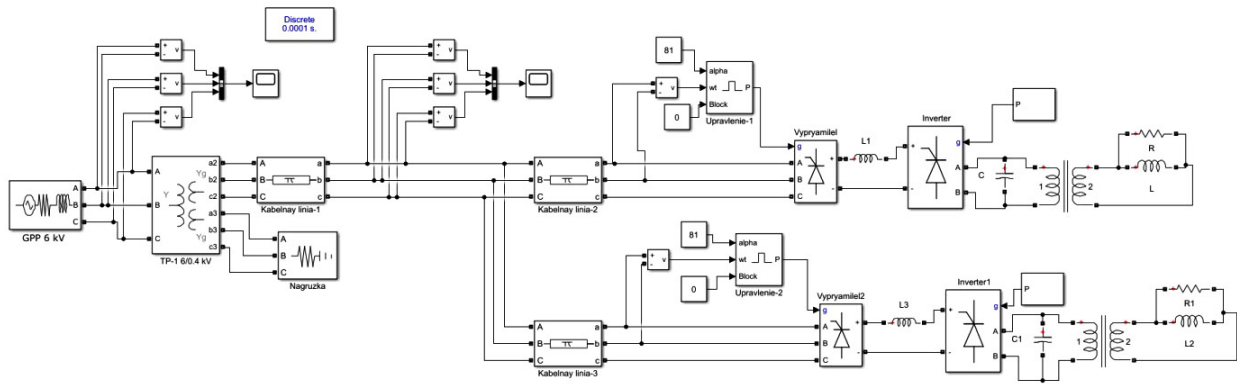


Рис. 6. Графическая интерпретация объекта исследования в Matlab
 Fig. 6. Graphical interpretation of the research object in the Matlab

ших гармоник. Более того, можно выявить кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжений $K_{U(n)}$.

Согласно ГОСТ 32144–2013, для данного коэффициента существует несколько допустимых пределов (нормально допустимые ($K_{U(n),н}$) и предельно допустимые ($K_{U(n),п}$). При определённом проценте значений коэффициентов $K_{U(n)}$ (не более 5 %) выход за пределы $K_{U(n),н}$ помеха не будет определяться, но наряду с этим ни одно значение коэффициентов $K_{U(n)}$ не должно выходить за пределы $K_{U(n),п}$. При других условиях в сети будет обнаружена помеха по $K_{U(n)}$ ($\delta K_{U(n)}$). Значения данных пределов для высших гармоник ($n = 2...40$) приведены в государственном стандарте. Например, если для 5-й гармоники ГОСТ 32144–2013 установил нормально допустимый предел значения коэффициента $K_{U(n)}$ равным 6 %, то значение предельно допустимого предела коэффициента $K_{U(n)}$ того же номера гармоники будет составлять 9 %.

Для проведения исследований необходимо сформировать проблемно-ориентированные математические модели элементов объекта исследования, которые рассматриваются по принципу декомпозиции, то есть математические модели элементов оборудования рассматриваются в отдельности, но с учетом реакции связи между ними [21, 22]. Электрическая схема объекта исследования представлена на рис. 5, а ее графическая интерпретация в программном продукте Matlab — на рис. 6.

Графическая интерпретация электрической схемы объекта исследования в программном продукте Matlab состоит из следующих блоков:

- блок «Three-Phase sources» реализует источник напряжения (трехфазный) с активно-индуктивным сопротивлением;
- блок «Three-phase transformer» реализует понижающий трансформатор;
- блок «Distributed Parameters Line» представляет модель трехфазной кабельной линии с сосредоточенными параметрами с учетом взаимной индуктивности фаз линии;
- блок «Universal Bridge» позволяет моделировать работу выпрямителя и инвертора, входящего в состав тиристорного преобразователя;
- блок «Linear Transformer» виртуально представляет высокочастотный закалочный трансформатор;
- RLC-цепь, подключенная параллельно закалочному трансформатору, моделирует работу батареи конденсаторов и активно-индуктивной нагруз-

ки преобразователя частоты, включающего в себя индуктор и участок нагреваемого тела;

— блок «Pulse Generator» является источником импульсного сигнала, который формирует управляющие импульсы на открытие вентилей инвертора;

— блок «Powergui», через подпрограмму «FFT Analysis», позволяет проводить исследование спектрального состава напряжения и тока в электрической схеме [22].

Исследуемый объект состоит из силового понижающего трансформатора Т1 типа ТМГ 1000-6/0,4; цеха крутоизогнутых отводов, в котором находится установка индукционного нагрева в составе генератора тока высокой частоты, выполненного на базе ТПЧ; батареи конденсаторов; закалочного трансформатора и активно-индуктивной нагрузки преобразователя частоты, представляющей собой индуктор и участок нагреваемого тела; механического цеха и лаборатории № 1.

Перед началом проведения активного эксперимента на разработанной имитационной модели объекта исследования примем к сведению, что угол отпирания тиристора в ТПЧ — от 0 до 90°. Для выявления отклонения электромагнитной обстановки в исследуемой имитационной модели объекта используется генератор случайных чисел (ГСЧ), который имитирует изменение значений по нормальному закону распределения случайной величины [22]. С помощью ГСЧ получены значения высших гармоник напряжения при различных углах отпирания тиристора (угол отпирания изменялся случайным образом 50 раз). Остальные блоки имитационной модели содержат параметры элементов исследуемой электрической сети, которые реально существуют на объекте исследования [22].

Основные результаты

Обработка массива данных $K_{U(n)}$, полученных в ходе проведения измерений в имитационной модели объекта исследования, производилось в программе для ЭВМ [23], разработанной коллективом авторов, на которую получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [24] на основе методов теории вероятности и математической статистики [25].

Для лучшего восприятия результаты обработки значений $K_{U(n)}$ в электрической сети 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки для фазы А представлены в табл. 1.

По представленным результатам видно, что в некоторых гармониках имеет место быть вероятность появления кондуктивной низкочастотной

Таблица 1. Результаты обработки значений $K_{U(n)}$ в электрической сети 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки на фазе А

Table 1. Results of processing the $K_{U(n)}$ values in a 0,4 kV electrical network by the presence of a nonlinear load on phase A

№ гармоники	$K_{U(n),\text{max.}}\%$	$K_{U(n),\text{min.}}\%$	$M[K_{U(n)}]\%$	$\sigma[K_{U(n)}]\%$	$K_{U(n),н.}\%$	$K_{U(n),п.}\%$	$P(\delta K_{U(n)})\%$
2	0,25	0,01	0,103	0,057	0,00	0,00	0,00
3	0,44	0,02	0,144	0,093	0,00	0,00	0,00
4	0,67	0,03	0,287	0,166	0,00	0,00	0,00
5	1,45	0,09	0,645	0,268	0,00	0,00	0,00
6	1,61	0,04	0,528	0,407	18,00	24,00	37,00
7	1,31	0,08	0,700	0,306	0,00	0,00	0,00
8	1,58	0,10	0,756	0,369	16,00	52,00	63,00
9	1,29	0,06	0,550	0,335	0,00	0,00	0,00
10	1,83	0,06	0,606	0,402	24,00	28,00	47,00
11	1,32	0,02	0,461	0,276	0,00	0,00	0,00
12	1,53	0,04	0,534	0,313	14,00	74,00	83,00
13	1,38	0,02	0,468	0,315	0,00	0,00	0,00
14	1,27	0,05	0,403	0,263	16,00	62,00	73,00
15	0,89	0,02	0,337	0,181	34,00	24,00	53,00
16	0,81	0,02	0,276	0,161	18,00	40,00	53,00
17	0,71	0,01	0,240	0,148	0,00	0,00	0,00
18	0,66	0,03	0,203	0,130	22,00	18,00	35,00
19	0,46	0,04	0,201	0,114	0,00	0,00	0,00
20	0,48	0,02	0,178	0,094	22,00	12,00	29,00
21	0,43	0,01	0,165	0,095	14,00	14,00	23,00
22	0,51	0,03	0,182	0,101	16,00	16,00	27,00
23	0,54	0,02	0,198	0,113	0,00	0,00	0,00
24	0,33	0,04	0,149	0,072	10,00	4,00	9,00
25	0,62	0,02	0,167	0,123	0,00	0,00	0,00
26	0,45	0,04	0,158	0,085	14,00	6,00	15,00
27	0,35	0,01	0,139	0,095	14,00	10,00	19,00
28	0,38	0,04	0,154	0,084	18,00	8,00	21,00
29	0,33	0,05	0,157	0,069	0,00	0,00	0,00
30	0,37	0,01	0,129	0,088	18,00	6,00	19,00
31	0,28	0,02	0,123	0,062	0,00	0,00	0,00
32	0,27	0,01	0,109	0,061	8,00	0,00	3,00
33	0,31	0,01	0,130	0,072	14,00	2,00	11,00
34	0,28	0,03	0,133	0,065	16,00	0,00	11,00
35	0,33	0,00	0,122	0,076	0,00	0,00	0,00
36	0,33	0,02	0,146	0,086	24,00	4,00	23,00
37	0,33	0,02	0,128	0,089	0,00	0,00	0,00
38	0,38	0,02	0,113	0,077	10,00	2,00	7,00
39	0,34	0,02	0,127	0,068	14,00	2,00	11,00
40	0,32	0,02	0,132	0,074	12,00	2,00	9,00

электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения как по нормально допустимому значению ($P(\delta K_{U(n),н})$), так и по предельно допустимому значению ($P(\delta K_{U(n),п})$). Общая вероятность появления помехи $\delta K_{U(n)}$, в процентах, находится по формуле

$$P(\delta K_{U(n)}) = P(\delta K_{U(n),н}) + P(\delta K_{U(n),п}) - 5. \quad (1)$$

В формуле (1) из суммы в процентах вероятности появления кондуктивной низкочастотной

электромагнитной помехи по $K_{U(n)}$ по нормально допустимому и предельно допустимому значению отнимается 5 %. Согласно ГОСТ 32144 – 2013, если до 5 % всех полученных значений коэффициентов $K_{U(n)}$ находятся выше нормально допустимых пределов, то это не считается помехой. Следовательно, в общую вероятность появления кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи $K_{U(n)}$ не входит. По данному принципу, согласно формуле (1), в табл. 2 найдены численные значения общей вероятности появления помехи $P(\delta K_{U(n)})$. Например, для

Таблица 2. Значения F -критерия Фишера
Table 2. Fisher's F -test values

Номер гармоники	Значения F -критерия Фишера
2	2,44
3	3,06
4	2,92
5	2,33
6	2,38
7	1,72
8	1,04
9	2,63
10	1,05
11	1,01
12	1,39
13	2,41
14	3,09
15	2,78
16	2,79
17	1,03
18	1,12
19	2,38
20	1,30
21	1,06
22	1,62
23	0,75
24	1,20
25	2,48
26	1,01
27	1,37
28	0,50
29	0,48
30	1,95
31	0,47
32	0,73
33	0,83
34	1,36
35	0,96
36	1,87
37	0,83
38	1,91
39	0,37
40	1,02

6-й гармоники на фазе А общая вероятность появления помехи $P(\delta K_{U(n)})$ в процентах равна

$$P(\delta K_{U(n)}) = 18,00 + 24,00 - 5 = 37,00.$$

По номерам гармоники, в которых присутствует вероятность появления помехи $P(\delta K_{U(n)})$, можно судить, какие воздействия эта помеха оказывает на рецепторы (элементы электрической сети, которые являются чувствительными к электромагнитным помехам). Например, известно, что гармоники 1, 4, 7, 10, ... образуют прямую последовательность; гармоники 2, 5, 8, 11, ... — обратную; гармоники кратные трем (3, 6, 9, ...) — нулевую.

Из табл. 1 видно, что воздействие гармонических составляющих напряжения прослеживается и для прямой последовательности (гармоники 10, 16, 22, 28, 34, 40), и для обратной последовательности (гармоники 8, 14, 20, 26, 32, 38), и для нулевой последовательности (гармоники 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39).

Из интерфейса результатов обработки значений коэффициентов $K_{U(n)}$ (рис. 7–8) понятно, что для гармоник 12 и 14 математическое ожидание значений коэффициентов $K_{U(n)}$ составляют 0,534 и 0,403, соответственно, а среднеквадратичные отклонения — 0,313 и 0,263.

После создания имитационной модели и проведения экспериментальных исследований необходимо проверить результаты на адекватность.

Адекватность модели проверялась с использованием F -критерия (критерия Фишера), согласно которому система дифференциальных уравнений адекватна, т. е. неточности моделирования существенно меньше ошибок измерений при следующем выражении:

$$F \leq F_{кр}, \quad (2)$$

где $F_{кр}$ — критическое значение F -критерия (находится из таблицы значений F -критерия Фишера).

Значение F -критерия определяется по формуле

$$F = \frac{S_{ост}^2}{S^2(\bar{y})}, \quad (3)$$

где $S_{ост}$ — дисперсия ошибки моделирования; $S^2(\bar{y})$ — дисперсия ошибок измерений выходной величины y , полученных в ходе пассивного эксперимента.

Выходной величиной в данном случае являются значения $K_{U(n)}$. Дисперсия ошибок $S(\bar{y})$ определяется по формуле

$$S^2 = \frac{1}{50 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{50} \left(y_i - \frac{\sum_{i=1}^{50} y_i}{50} \right)^2. \quad (4)$$

Так как при моделировании получено 50 значений $K_{U(n)}$, то из результатов пассивного эксперимента сделана выборка 50-ти значений в период работы электротермических установок с учетом отбраковывания грубых ошибок, полученных в ходе эксперимента. Выборка 50-ти подряд значений $K_{U(n)}$ производилась из проведенного эксперимента в электрических сетях реального объекта [26] и значения $K_{U(n)}$ взяты из результатов проведенного эксперимента в имитационной модели объекта исследования.

Зная значение среднеквадратичного отклонения, определяем значение дисперсии. Дисперсия ошибки моделирования вычисляется по формуле

$$S_{ост}^2 = S_{\Delta}^2 / f, \quad (5)$$

где S_{Δ}^2 — выборочная дисперсия случайной ошибки; f — число степеней свободы эксперимента.

Выборочная дисперсия случайной ошибки S_{Δ}^2 вычисляется по формуле

$$S_{\Delta}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^p)^2, \quad (6)$$

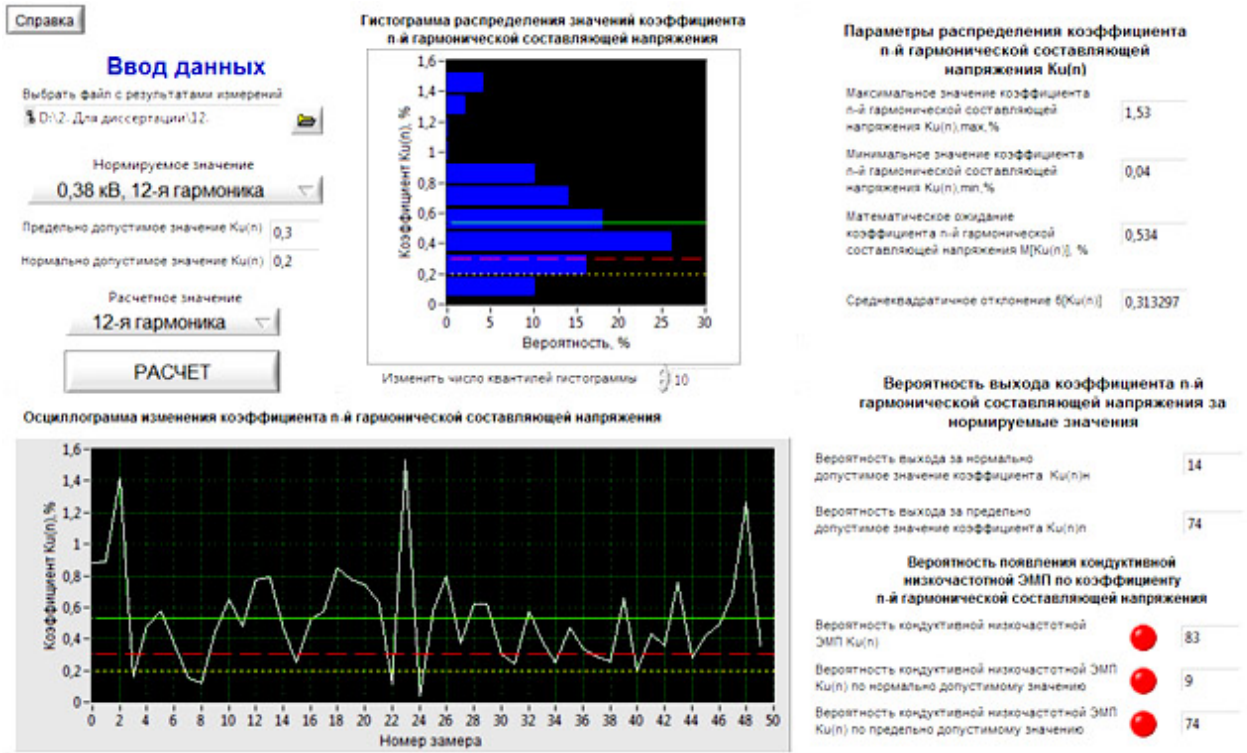


Рис. 7. Интерфейс результата обработки значений коэффициента $\delta K_{U(12)}$
 Fig. 7. Interface of the result of processing the values of the $\delta K_{U(12)}$ coefficient

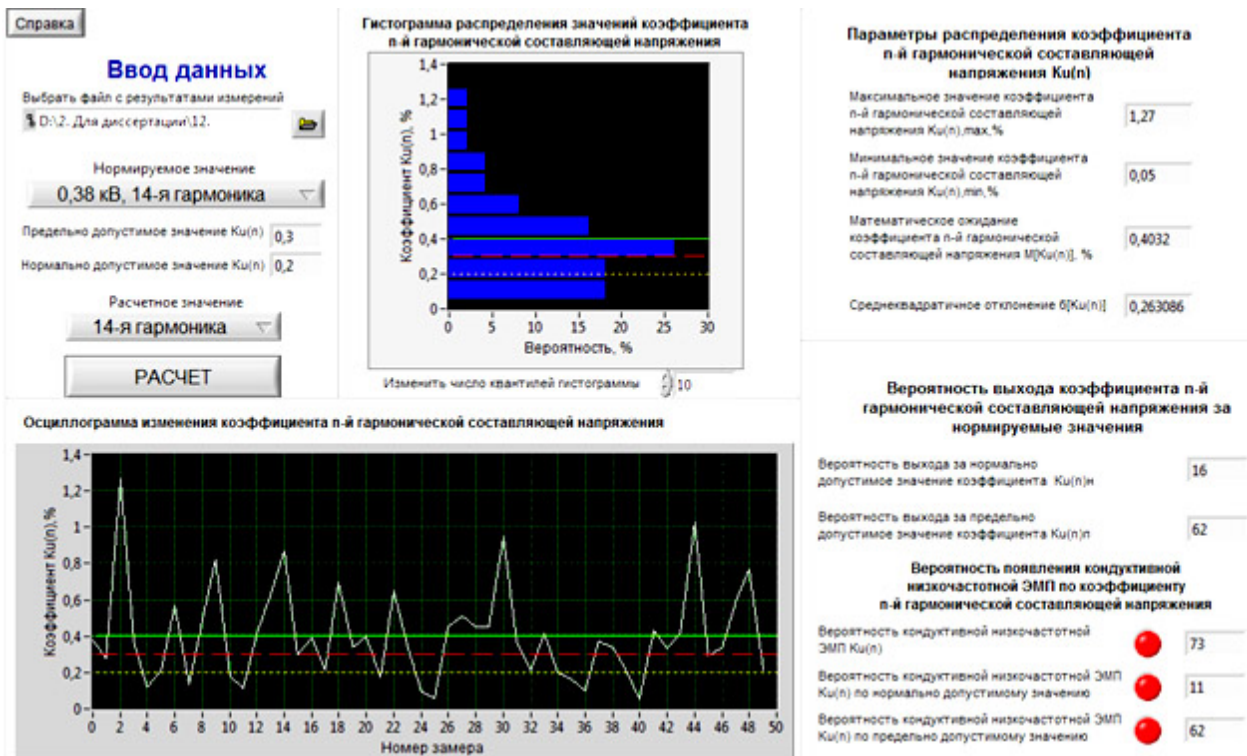


Рис. 8. Интерфейс результата обработки значений коэффициента $\delta K_{U(14)}$
 Fig. 8. Interface of the result of processing the values of the $\delta K_{U(14)}$ coefficient

где y_i — значения из пассивного эксперимента; y_i^p — значения, полученные по имитационной модели.

Число степеней свободы эксперимента рассчитывается по формуле

$$f = n - (m + 1), \quad (7)$$

где n — количество опытов; m — число рассчитываемых параметров модели.

Зная дисперсии ошибки моделирования и используя формулу (3), определяем F -критерий

(табл. 2). Необходимо найти критическое значение F -критерия из таблицы значений F -критерия Фишера [27]. Для этого определяем коэффициент k_1 , равный 2 (порядок модели) и коэффициент k_2 , равный 50 (количество опытов). Исходя из найденных коэффициентов, по таблице значений F -критерия Фишера определяем значения. Так как значения F -критерия Фишера всех гармоник ниже, чем 3,18, то условие (2) выполняется. Следовательно, модель объекта исследования адекватна.

Вывод

В ходе моделирования системы электроснабжения объекта исследования разработана имитационная модель в программном продукте Matlab. Данная модель позволяет проводить анализ качества электрической энергии и решать разнообразные задачи, которые относятся к анализу поведения объекта моделирования.

На основе анализа сделан вывод о том, что в узле нагрузки объекта исследования значение коэффициента n -й гармонических составляющих напряжения превышает нормально и предельно допустимые значения в соответствии с ГОСТом 32144–2013.

Список источников / References

1. Степанов В. С., Солонина Н. Н., Суслов К. В. Анализ влияния гармонических колебаний на работу электрических сетей и потребителей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 222–227. EDN: TMYXPV.

Stepanov V. S., Solonina N. N., Suslov K. V. Analiz vliyaniya garmonicheskikh kolebaniy na rabotu elektricheskikh setey i potrebiteley [Analysis of harmonic oscillation effect on the operation of electrical networks and consumers]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2015. No. 3 (98). P. 222–227. EDN: TMYXPV. (In Russ.).

2. Хацевский К. В., Денчик Ю. М., Клеутин В. И. [и др.] Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). С. 212–214. EDN: PBGNQN.

Khatsevskiy K. V., Denchik Yu. M., Kleutin V. I. [et al.] Problemy kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya [Quality of electric power in electrical supply system]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2012. No. 2 (110). P. 212–214. EDN: PBGNQN. (In Russ.).

3. Бершадский И. А., Якимишина В. В., Наглюк Е. Я. Влияние несинусоидальности и несимметрии в четырехпроводной сети непромышленных потребителей на снижение пропускной способности кабелей // Вестник Донецкого национального технического университета. 2020. № 2 (20). С. 18–25. EDN: QECTFU.

Bershadskiy I. A., Yakimishina V. V., Naglyuk E. Ya. Vliyaniye nesinusoidal'nosti i nesimmetrii v chetyrehprovodnoy seti nepromyshlennykh potrebiteley na snizheniye propusknoy sposobnosti kabeley [Impact of sinusoidality and asymmetry in four-wire network of non-industrial consumers on reducing the cable capacity]. Vestnik Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. *Vestnik Donetsk National Technical University*. 2020. No. 2 (20). P. 18–25. EDN: QECTFU. (In Russ.).

4. Руди Д. Ю., Антонов А. И., Вишнягов М. Г. [и др.]. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125. EDN: VQNFZY.

Rudi D. Yu., Antonov A. I., Vishnyagov M. G. [et al.]. Issledovaniye vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Study of higher harmonics in low voltage electrical networks]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*.

2018. No. 6 (162). P. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125. EDN: VQNFZY. (In Russ.).

5. Антонов А. И., Руди Д. Ю., Хацевский К. В. Исследование качества электроэнергии в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). С. 123–30. DOI: 10.18822/byusu202301123-130. EDN: TNSTWH.

Antonov A. I., Rudi D. Yu., Khatsevskiy K. V. Issledovaniye kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami [Study of the quality of electric power in electric networks with semiconductor converters]. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. *Yugra State University Bulletin*. 2023. No. 1 (68). P. 123–30. DOI: 10.18822/byusu202301123-130. EDN: TNSTWH. (In Russ.).

6. Рылов Ю. А. Расчет режимов работы систем электроснабжения и определение долевого вклада потребителей в показатели качества электроэнергии при наличии несинусоидальных нагрузок: дис. ... канд. тех. наук. Казань, 2006. 152 с.

Rylov Yu. A. Raschet rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya i opredeleniye dolevogo vklada potrebiteley v pokazateli kachestva elektroenergii pri nalichii nesinusoidal'nykh nagruzok [Calculation of operating modes of power supply systems and determination of the share contribution of consumers to the quality indicators of electric power in the presence of non-sinusoidal loads]. Kazan, 2006. 152 p. (In Russ.).

7. Викторов В. А., Мешалкин В. А., Салтыков В. М. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381–401. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415. EDN: JGIIPU.

Viktorov V. A., Meshalkin V. A., Saltykov V. M. Issledovaniye urovney i spektrov vysshikh garmonik toka v elektricheskikh setyakh pitaniya komp'yuternoy tekhniki i osnovnyye meropriyatiya po obespecheniyu elektromagnitnoy sovmestimosti [The research of the levels and spectra of higher harmonics of current in electrical power networks of computer equipment and the basic activities of the electromagnetic compatibility provision]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019. No. 4. P. 381–401. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415. EDN: JGIIPU. (In Russ.).

8. Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А., Мингазов А. С., Полищук В. В. О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 126–127. EDN: RPUKPH.

Abramovich B. N., Sychev Yu. A., Mingazov A. S., Polishchuk V. V. O kompensatsii vysshikh garmonik toka i napryazheniya, sozdavayemykh istochnikom bespereboynogo pitaniya [On the elimination of voltage and current harmonics created by uninterruptible power]. Neftyanoye khozyaystvo. *Oil Industry*. 2013. No. 10. P. 126–127. EDN: RPUKPH. (In Russ.).

9. Широков О. Г., Алферова Т. В., Бахмутская В. В., Юрлов И. Ю. Оценка влияния осветительной нагрузки на показатели несинусоидальности напряжения и потребляемого тока // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 2 (19). С. 28–40. EDN: OVGBVB.

Shirokov O. G., Alferova T. V., Bakhmutskaya V. V., Yurlov I. Yu. Otsenka vliyaniya osvetitel'noy nagruzki na pokazateli nesinusoidal'nosti napryazheniya i potreblayemogo toka [Assessment of the impact of lighting load on the indices of non-sinusoidal voltage and consumed current]. Agrotekhnika i energoobespecheniye. *Agricultural Machinery and Energy Supply*. 2018. No. 2 (19). P. 28–40. EDN: OVGBVB. (In Russ.).

10. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1994. 264 с.

Zhezhelenko I. V. Vysshieye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. 3rd ed., revised and suppl. Moscow, 1994. 264 p. (In Russ.).

11. Шидловский А. К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях: моногр. Киев: Наукова думка, 2005. 209 с. ISBN 966-00-0471-0. EDN: QMLTXN.
- Shidlovskiy A. K., Zharkin A. F. Vysshieye garmoniki v nizkovol'tnykh elektricheskikh setyakh [Higher harmonics in low-voltage electrical networks]. Kyiv, 2005. 209 p. ISBN 966-00-0471-0. EDN: QMLTXN. (In Russ.).
12. Руди Д. Ю., Горелов С. В., Антонов А. И. [и др.] Анализ несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева // Вестник Чувашского университета. 2021. № 1. С. 122–133. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-122-133. EDN: DBZXOF.
- Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Antonov A. I. [et al.] Analiz nesinusoidal'nosti napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Analysis of voltage non-sinusoidality in power supply systems with induction heating units]. Vestnik Chuvashskogo universiteta. *Bulletin of the Chuvash University*. 2021. No. 1. P. 122–133. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-122-133. EDN: DBZXOF. (In Russ.).
13. Руди Д. Ю. Электромагнитная совместимость в системе электроснабжения механического цеха ЗАО «Сибгазстройдеталь» с электроустановками индукционного нагрева // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 35–43. EDN: UFCKMB.
- Rudi D. Yu. Elektromagnitnaya sovmestimost' v sisteme elektrosnabzheniya mekhanicheskogo tsekha ZAO «Sibgazstroydetal'» s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Electromagnetic compatibility in the power supply system of the mechanical shop of CJSC Sibgazstroydetal with induction heating electrical installations]. Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont. *Electrical Equipment: Operation and Repair*. 2021. No. 10. P. 35–43. EDN: UFCKMB. (In Russ.).
14. Коржов Д. Н. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2015. 169 с.
- Korzhev D. N. Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Ensuring electromagnetic compatibility in power supply systems of industrial enterprises with induction heating installations]. Belgorod, 2015. 169 p. (In Russ.).
15. Ордабаев М. Е. Повышение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения при гармоническом воздействии: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 168 с.
- Ordabayev M. E. Povysheniye elektromagnitnoy sovmestimosti v sistemakh elektrosnabzheniya pri garmonicheskom vozdeystvii [Increasing electromagnetic compatibility in power supply systems under harmonic influence]. Moscow, 2009. 168 p. (In Russ.).
16. Лютаревич А. Г., Вырва А. А., Долингер С. Ю. [и др.] Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2009. № 1 (77). С. 109–113. EDN: MVPQYB.
- Lyutarevich A. G., Vyrvva A. A., Dolinger S. Yu. [et al.] Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot vysshikh garmonik v elementakh sistem elektrosnabzheniya [Estimation of additional power losses due to higher harmonics in elements of power system]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2009. No. 1 (77). P. 109–113. EDN: MVPQYB. (In Russ.).
17. Осипов Д. С., Лютаревич А. Г., Ткаченко В. А., Логунова Я. Ю. Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23, № 1. С. 38–47. DOI: 10.14529/power230104. EDN: UURUKU.
- Osipov D. S., Lyutarevich A. G., Tkachenko V. A., Logunova Ya. Yu. Algoritm rascheta poter' moshchnosti, obuslovlennykh vysshimi garmonikami i intergarmonikami na osnove veyvlet-preobrazovaniya [An algorithm for calculating power losses due to higher harmonics and interharmonics based on the wavelet transform]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2023. Vol. 23, no. 1. P. 38–47. DOI: 10.14529/power230104. EDN: UURUKU. (In Russ.).
18. Осипов Д. С., Коваленко Д. В., Горюнов В. Н., Долгих Н. Н. Расчет дополнительных потерь мощности при несинусоидальных режимах систем электроснабжения с учетом температурной зависимости сопротивления токоведущих частей // Ученые Омска — Региону: сб. тр. I Регион. науч.-техн. конф. 2016. С. 44–48. EDN: YVQSV.
- Osipov D. S., Kovalenko D. V., Goryunov V. N., Dolgikh N. N. Raschet dopolnitel'nykh poter' moshchnosti pri nesinusoidal'nykh rezhimakh sistem elektrosnabzheniya s uchedom temperaturnoy zavisimosti soprotivleniya tokovedushchikh chastei [Calculation of additional power losses in non-sinusoidal modes of power supply systems considering the temperature dependence of the current-carrying parts resistance]. *Uchenyye Omska — Regionu*. 2016. P. 44–48. EDN: YVQSV. (In Russ.).
19. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Электрооборудование. В 2 т. / Под общ. ред. А. А. Федорова. Москва: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 487 с.
- Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu. Elektrooborudovaniye. V 2 t. [Handbook of power supply and electrical equipment. Electrical equipment] / Ed. by A. A. Fedorov. Moscow, 1987. Vol. 2. 487 p. (In Russ.).
20. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / Под ред.: В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2006. 432 с. ISBN 5-8119-0201-0. EDN: QMJPSJ.
- Ivanova E. V. Konduktivnyye elektromagnitnyye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh [Conductive electromagnetic interference in electric power systems] / Ed. by V. P. Gorelov, N. N. Lizaleka. Novosibirsk, 2006. 432 p. ISBN 5-8119-0201-0. EDN: QMJPSJ. (In Russ.).
21. Антонов А. И., Руди Д. Ю., Хацевский К. В. Моделирование системы электроснабжения цеха кривоизогнутых отводов в программе Matlab // Новые технологии в ТЭК, энергоэффективность и энергосбережение в ТЭК: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Ханты-Мансийск, 2023. С. 12–19. EDN: OBSZTI.
- Antonov A. I., Rudi D. Yu., Khatsevskiy K. V. Modelirovaniye sistemy elektrosnabzheniya tsekha krivoizognutykh otvodov v programme Matlab [Modeling of the power supply system of the shop of curved branches in Matlab]. Novyye tekhnologii v TEK, energoeffektivnost' i energosberezheniye v TEK. *New Technologies in the FEC, Energy Efficiency and Energy Saving in FEC*. Khanty-Mansiysk, 2023. P. 12–19. EDN: OBSZTI. (In Russ.).
22. Антонов А. И. Повышение качества функционирования электрических сетей на основе компьютерного моделирования несимметричных режимов: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2020. 187 с.
- Antonov A. I. Povysheniye kachestva funktsionirovaniya elektricheskikh setey na osnove komp'yuternogo modelirovaniya nesimmetrichnykh rezhimov [Improving the quality of electrical networks based on computer modeling of asymmetric modes]. Novosibirsk, 2020. 187 p. (In Russ.).
23. Руди Д. Ю., Вишнягов М. Г., Руппель А. А. Компьютерная программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 65–78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE.
- Rudi D. Yu., Vishnyagov M. G., Ruppel A. A. Komp'yuternaya programma dlya opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koeffitsiyentu n-y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [Computer program for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the nth harmonic component of the voltage]. Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal. *International Scientific Journal*. 2021. No. 1. P. 65–

78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE. (In Russ.).

24. Руди Д. Ю., Антонов А. И., Денчик Ю. М. [и др.]. Программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения: программа для ЭВМ RU № 2021613934. Москва: ФИПС, 2024. Бюл. № 2. EDN: LTRBRG.

Rudi D. Yu., Antonov A. I., Denchik Yu. M. [et al.]. Programma dlya opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomexi po koefitsiyentu n -y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [Program for determining conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the n -th harmonic component of voltage: computer program No. 2021613934]. Moscow, 2024. Bull. No. 2. EDN: LTRBRG. (In Russ.).

25. Руди Д. Ю., Горелов С. В., Вишнягов М. Г. [и др.] Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 33. С. 177–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.11. EDN: WZNYAM.

Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Vishnyagov M. G. [et al.] Algoritm opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomexi po koefitsiyentu n -y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [The algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the n th harmonic component of the voltage]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems*. 2020. No. 33. P. 177–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.11. EDN: WZNYAM. (In Russ.).

26. Антонов А. И., Руди Д. Ю., Хацевский К. В. Анализ результатов исследования качества электроэнергии в электрических сетях ЗАО «Сибгазстройдеталь» // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 4. С. 143–152. DOI: 10.18822/byusu202304143-152. EDN: HILOYG.

Antonov A. I., Rudi D. Yu., Khatsevskiy K. V. Analiz rezultatov issledovaniya kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh ZAO «Sibgazstroydetal» [Analysis of the results of studying the quality of electric power in the electric networks of the CJSC Sibgazstroydetal]. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. *Yugra State University Bulletin*. 2023. No. 4. P. 143–152. DOI: 10.18822/byusu202304143-152. EDN: HILOYG. (In Russ.).

27. Бронштейн И. Н., Семедьяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Москва: Наука, 1981. 721 с.

Bronshteyn I. N., Semendiyayev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of mathematics for engineers and students]. Moscow, 1981. 721 p. (In Russ.).

АНТОНОВ Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

Адрес для переписки: aleksandr_antonov_85@mail.ru

РУДИ Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5222-7906

AuthorID (РИНЦ): 830094

Адрес для переписки: dima_rudi@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 06.05.2025; принята к публикации 18.07.2025.

ANTONOV Alexander Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (Branch) Siberian State University Water Transport (OIWT (branch) SSUWT), Omsk.

SPIN-code: 5682-8929

AuthorID (RSCI): 842787

Correspondence address: aleksandr_antonov_85@mail.ru

RUDI Dmitry Yurievich, Senior Lecturer of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 5222-7906

AuthorID (RSCI): 830094

Correspondence address: dima_rudi@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 06.05.2025; accepted for publication 18.07.2025.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА СМЕЖНЫЕ УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

В статье исследована возможность совместного функционирования тяговой сети железных дорог переменного тока и смежных устройств, подверженных электромагнитному влиянию, с помощью имитационного моделирования в программах SimInTech и Elcut. При моделировании учтены распределенный характер параметров линий и несинусоидальность питающих напряжений. Полученные в программе SimInTech значения напряжения и тока явились исходными данными для моделирования картины электромагнитного поля в программе Elcut. Приведены результаты моделирования электрического и магнитного полей, которые позволяют оценить интенсивность полей, их напряженности, значения наведенного напряжения в подверженном влиянию объекте. Показаны перспективы научных исследований в области анализа электромагнитных полей, создаваемых тяговой сетью переменного тока при различных режимах ее работы.

Ключевые слова: тяговая сеть переменного тока, электрические железные дороги, имитационное моделирование, электромагнитное поле, напряженность электромагнитного поля, наведенное напряжение.

Для цитирования: Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Исследование влияния тяговой сети железных дорог переменного тока на смежные устройства с помощью имитационного моделирования // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 44–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-44-50. EDN: IPUIKZ.



© Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE INFLUENCE OF AC RAILWAY TRACTION NETWORK ON ADJACENT DEVICES USING SIMULATION MODELING

T. V. Kovaleva, O. O. Komyakova, N. V. Pashkova

Omsk State Transport University, Omsk

The article investigates the possibility of joint operation of the traction network of alternating current railways and related devices subject to electromagnetic influence using simulation modeling in the SimInTech and Elcut programs. The distributed nature of the line parameters and non-sinusoidality of the supply voltages are taken into account during the modeling. The voltage and current values obtained in the SimInTech program are the initial data for modeling the electromagnetic field pattern in the Elcut program. The results of modeling electric and magnetic fields are presented, which allow to estimate the intensity of the fields, their tension, the value of the induced voltage in the affected object. The prospects of scientific research in the field of analysis of electromagnetic fields created by the traction network of alternating current in various modes of its operation are shown.

Keywords: traction network of alternating current, electric railways, simulation model, electromagnetic field, electromagnetic intencion, induced voltage.

For citation: Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Study of the influence of AC railway traction network on adjacent devices using simulation modeling. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 44–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-44-50. EDN: IPUIKZ.



Введение

Эксплуатация существующих энергетических систем требует учитывать условия безопасной работы всех объектов и их электромагнитной совместимости. При работе этой системы возникают электромагнитные поля. Одним из основных нормируемых параметров электромагнитного поля являются его напряженности, превышение пределов которых приводит к нарушению электромагнитной безопасности энергетической системы.

Энергетическая система железных дорог переменного тока представляет собой сложную электрическую цепь, состоящую из элементов с распределенными (высоковольтные линии электропередач, тяговая сеть и др.) и сосредоточенными параметрами (трансформаторы, преобразователи электрической энергии, электроподвижной состав и др.) [1, 2].

В этой системе электромагнитные процессы в значительной степени определяются свойствами элементов с распределенными параметрами, которые приводят к появлению нежелательных стационарных волновых процессов. Нестационарные волновые процессы возникают из-за коммутации оборудования электровозов, входящих как динамическая нагрузка в систему тягового электроснабжения. В результате волновых процессов ухудшается гармонический состав напряжения и тока и, как следствие, условия работы смежных устройств [3].

Высоковольтные линии электропередачи и тяговая сеть электрических железных дорог, как цепи с распределенными параметрами, являются источниками электромагнитного влияния на смежные устройства, находящиеся в непосредственной близости (например, линии связи, железнодорожные устройства сигнализации, централизации и блокировки и т.д.).

В настоящее время так же остро стоит проблема электромагнитной совместимости линий электропередачи и тяговой сети с подвижными электронными и радиоэлектронными средствами (например, беспилотными летательными аппаратами), для которых эти линии являются индустриальными макроисточниками электромагнитных полей [4].

Актуальность этой проблемы связана с потенциальным применением беспилотных летательных аппаратов для диагностирования систем электроснабжения, в том числе элементов контактной сети [5]. Электромагнитные поля, создаваемые тяговой сетью, могут заглушать или искажать спутниковые сигналы, приводя к потере позиционирования или некорректным координатам, вызывать задержки или потерю сигнала при управлении по радиоканалу, а также вызывать сбои в работе бортовой электроники, включая полетный контроллер, датчики и сервоприводы [6–8].

Электромагнитные влияния бывают двух видов: за счет напряжения и тока рабочей частоты и высокочастотные за счет физических эффектов. Диапазон частот электромагнитного влияния составляет от 10 Гц и до 1 ГГц и более. В непосредственной близости к тяговой сети преобладает электромагнитное поле основной частоты, а при удалении от нее — высокочастотное.

Решение задачи электромагнитной совместимости и определение уровней напряженности электрических и магнитных полей может осуществляться с помощью имитационного моделирования.

Цель исследования

Разработка научно обоснованного способа оценки влияния электромагнитного поля от линий переменного тока с учетом их распределенных параметров. Картина электромагнитного поля получена на основе моделирования методом конечных элементов в программе Elcut. В качестве исходных данных использованы результаты динамического моделирования линий в среде SimInTech, при котором была учтена несинусоидальность напряжения в энергетической системе.

Основная часть

Для учета волновых процессов в высоковольтных линиях электропередачи, линиях связи и тяговой сети необходимо учитывать распределенный характер параметров, определяемых на единицу длины.

Тепловые потери энергии в линии обусловлены протеканием токов, а также явлением поверхностного эффекта. Эти потери учитываются при расчетах как активные сопротивления.

Электромагнитное поле, которое возникает под воздействием переменного тока, создает вдоль линии электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции и взаимной индукции между проводами линии. Токи смещения обусловлены емкостной проводимостью между проводами линии и между проводами и землей. На поверхности изоляторов возникают активные токи утечки. При плохих погодных условиях на некоторых участках линий электропередачи высокого напряжения может возникнуть коронный разряд между проводами из-за снижения изоляции воздуха. Перечисленные явления распределены равномерно по всей длине линии и определяют первичные параметры линии. Протяженность линии также оказывает влияние на протекание в ней электромагнитных процессов, так как проявляется необходимость учета конечной скорости распространения этих процессов. Кроме распределенных по длине параметров проводов линий учитываются также распределенные параметры среды.

В качестве объекта исследования обычно рассматривают двухпроводную однофазную однородную линию. Однако высоковольтные линии электропередачи представляют собой трехфазную цепь. Схема замещения элементарного участка трехфазной линии представлена на рис. 1.

Анализ электромагнитных процессов в трехфазной линии передачи может быть проведен с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа для схемы замещения. Для приведения уравнений для трехфазной линии электропередачи к виду уравнений двухпроводной однофазной линии используется известный алгоритм [9].

Дальнейший расчет напряжения и тока в трехфазной линии электропередачи может проводиться как для модели двухпроводной линии.

Основу математического аппарата для исследования однородных двухпроводных линий представляет система из двух дифференциальных уравнений для тока и напряжения линий, которые известны как телеграфные уравнения:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases}$$

где r_0, L_0, g_0, C_0 — первичные параметры линии.

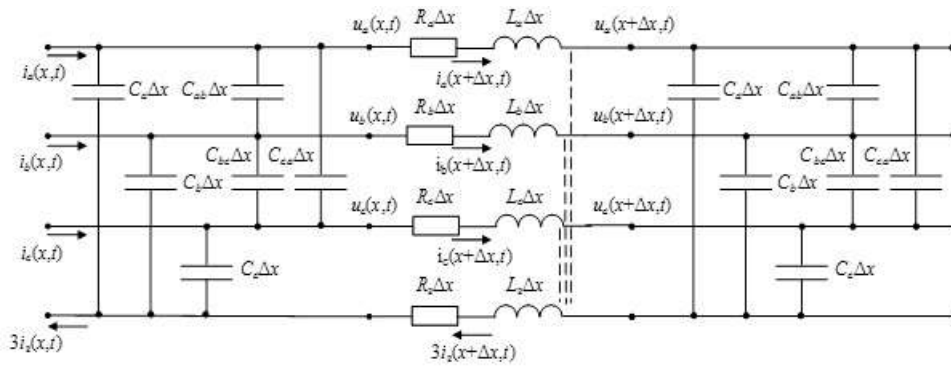


Рис. 1. Схема замещения элементарного участка трехфазной линии передачи
 Fig. 1. Equivalent circuit of an elementary section of a three-phase transmission line

При реализации приведенного математического аппарата в среде динамического моделирования SimInTech учтена динамика комплексных моделей виртуальных объектов.

Определение напряжения и тока в любой точке линии при различных режимах ее работы экспериментальным путем затруднительно. В частности, в тяговой сети электрических железных дорог динамической нагрузкой является электроподвижной состав. Электровоз, как сложная нелинейная нагрузка, определяет нестационарные волновые процессы за счет коммутации его оборудования.

Реализация физической модели цепи с распределенными параметрами, имеющей большую длину, в лабораторных условиях не позволяет в полной мере оценить волновые процессы, которые в ней происходят.

Решение задачи определения напряжения и тока в различных точках линии при питании ее синусоидальным и несинусоидальным напряжением можно осуществить с помощью имитационного моделирования системы. В [10, 11] показано, что для решения задачи оценки энергетических параметров системы тягового электроснабжения эффективным средством является программный комплекс SimInTech.

На рис. 2 приведен пример динамического моделирования в среде SimInTech участка тяговой сети с нелинейной нагрузкой в виде движущегося электровоза.

Для тяговых подстанций электроподвижной состав служит генератором высших гармоник тока. Несинусоидальный ток является источником искажения напряжения в различных точках системы электроснабжения.

Отрицательное действие высших гармонических составляющих в основном проявляется в двух видах:

- несинусоидальное напряжение может нарушить работу электродвигателей, конденсаторных батарей, устройств защиты, различных приборов;
- высшие гармоники тока, протекающие по проводам тяговой сети, создают электромагнитное влияние на коммуникации, проложенные вдоль железной дороги.

Несинусоидальность напряжения вызывается высшими гармониками тока преобразователей электровозов и подстанций, которые, протекая по элементам электрической цепи, создают в них потери напряжения.

Для учета несинусоидальности питающего напряжения была разработана модель в среде динамического моделирования SimInTech, в которой

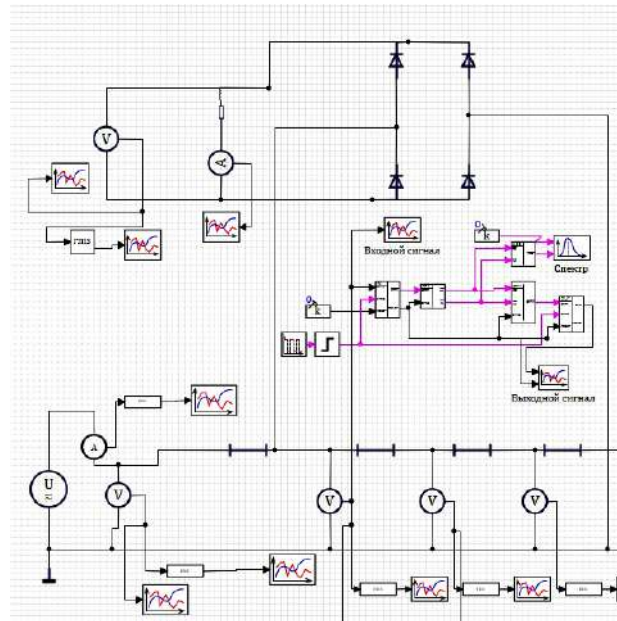


Рис. 2. Элемент участка тяговой сети с нелинейной моделью электровоза в среде динамического моделирования SimInTech
 Fig. 2. Element of a traction network section with a nonlinear model of an electric locomotive in the SimInTech dynamic modeling environment

используются источники соответствующих гармонических составляющих ряда Фурье, содержащих массив нечетных гармоник (рис. 3). Действующие значения напряжения гармоник взяты из результатов натурального эксперимента.

В любой точке созданной модели линии можно устанавливать идеальные вольтметры и амперметры, которые фиксируют действующие значения напряжения и тока, а также анализаторы гармонического спектра кривых напряжения и тока. Полученные в результате моделирования в SimInTech значения напряжения и тока в любой точке участка тяговой сети при различных режимах ее работы являются исходными данными для программы Elcut, которая позволяет моделировать и анализировать физические поля, в том числе электромагнитное поле переменного тока.

В программе Elcut можно исследовать отдельные составляющие электромагнитного поля (магнитную и электрическую) на различных частотах.

Магнитное поле, возникающее вокруг проводов тяговой сети из-за протекания тока, сохраняет свою

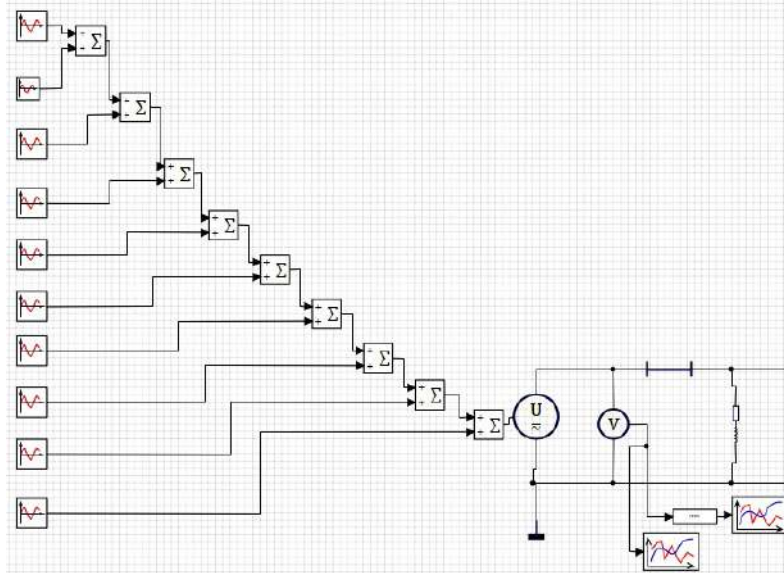


Рис. 3. Модель несинусоидального источника в среде SimInTech
 Fig. 3. Model of a non-sinusoidal source in the SimInTech environment

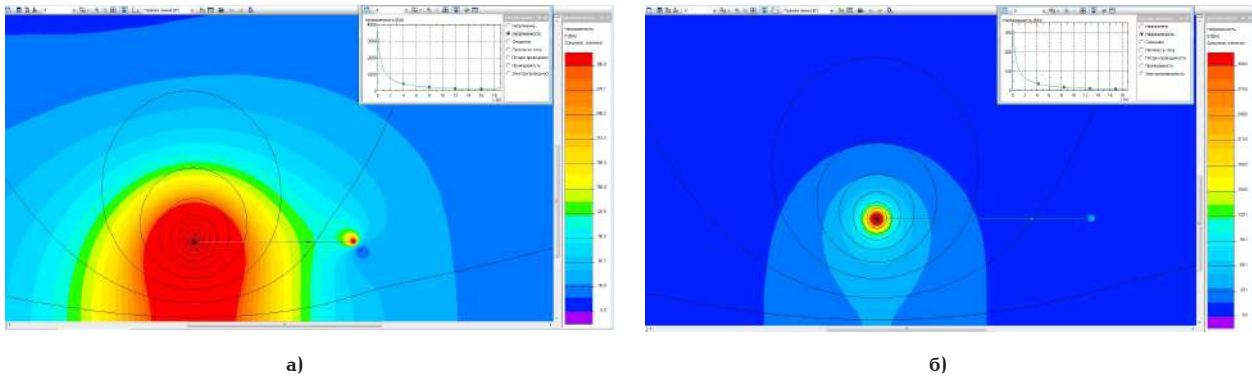


Рис. 4. Результаты моделирования электрического поля в программе Elcut на частотах: а) 50 Гц и б) 250 Гц
 Fig. 4. Results of electric field modeling in the Elcut program at frequencies: a) 50 Hz and б) 250 Hz

интенсивность на значительном расстоянии от нее и зависит от значения тока, типа провода и расстояния до смежных устройств.

Электрическое поле зависит от распределения потенциала на поверхности провода тяговой сети и расстояния до смежных устройств.

Программа Elcut позволяет численно и визуалью с помощью цветовой шкалы наблюдать распределение интенсивности электромагнитного поля в заданном радиусе вокруг влияющего провода.

В качестве примера в программе Elcut созданы модели магнитного и электрического полей вокруг контактного провода (в приведенной модели взят радиус 30 м) тяговой сети переменного тока 27,5 кВ при двух различных частотах (основной 50 Гц и частоте пятой гармоники 250 Гц). Исходными условиями для моделирования явились значения напряжения и тока тяговой сети, полученные в результате исследования в SimInTech на входе тяговой подстанции при нахождении электровоза в конце межподстанционной зоны. При моделировании в программе SimInTech взяты следующие исходные данные: контактный провод протяженностью 5 км с первичными параметрами $R_0 = 0,21 \text{ Ом/км}$, $L_0 = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$, $C_0 = 17 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$, с динамической нелинейной мостовой нагрузкой, заменяющей электровоз [12]. Подверженный влиянию объект может находиться на любом расстоянии

от влияющего провода. В качестве примера рассмотрена изолированная с обеих сторон линия, подвешенная над землей на высоте 10 м. При геометрическом построении модели провода линии создается слой диэлектрика, регулируя электропроводность которого можно учитывать ток утечки варьированием значения относительной диэлектрической проницаемости среды этого диэлектрика.

Зависимости напряженности электрического и магнитного полей от расстояния между влияющим проводом и объектом, подверженным влиянию, приведены на графиках (рис. 4 и 5).

Полученные зависимости подтверждают, что электромагнитные поля, возникающие в нормальных режимах работы линии на низких частотах, на незначительном удалении от источника влияния имеют большую напряженность электрического и магнитного полей.

С увеличением расстояния между влияющим проводом и смежными устройствами интенсивность поля ослабевает, поэтому электромагнитное влияние уменьшается. Программа Elcut позволяет визуалью оценить интенсивность поля в соответствии с цветовой шкалой, расположенной на рис. 4 и 5 справа.

С ростом номера гармонической составляющей напряжения в тяговой сети уменьшается его амплитуда, что приводит к уменьшению интенсивно-

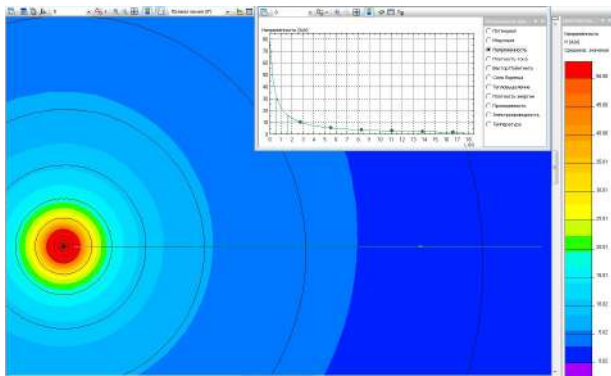


Рис. 5. Результаты моделирования магнитного поля в программе Elcut на частоте 50 Гц
Fig. 5. Results of magnetic field modeling in the Elcut program at a frequency of 50 Hz

сти электрического поля (рис. 4). Для магнитного поля такой зависимости не наблюдается, поэтому на рис. 5 приведены результаты моделирования только на основной частоте.

Электромагнитное влияние на смежные устройства может быть оценено уровнем наведенного напряжения, который является одним из ключевых показателей. На значение наведенного напряжения оказывают влияние различные факторы, в частности частота гармоник напряжений во влияющей линии и параметры, распределенные по ее длине [13].

Наведенное напряжение содержит электрическую и магнитную составляющие. В качестве примера в данной работе определена электрическая составляющая наведенного напряжения, которая обратно зависит от расстояния до влияющей линии, прямо пропорциональна рабочему напряжению влияющей линии и сопротивлению заземления. Эта составляющая не зависит от тока нагрузки, величины напряжения отключенной и не заземленной линии и от расстояния, на котором линии влияют друг на друга. Предельно допустимое значение уровня электрической составляющей наведенного влияющим проводом напряжения на отключенной линии составляет 25 В [14].

На практике измерение наведенных напряжений на отключенных линиях тяговой сети весьма затруднительно, поэтому можно воспользоваться результатами моделирования в программе Elcut. Значения гармоник напряжения влияющего провода (контактного провода тяговой сети) получены в результате моделирования в программе SimInTech с исходными данными, приближенными к реальным условиям функционирования тяговой сети переменного тока 27,5 кВ.

Напряжение гармоник между влияющим проводом и рельсом (моделирование в SimInTech), а также электрическая составляющая наведенных напряжений в отключенной линии, подверженной влиянию, которая находится на удалении от влияющего провода на расстоянии 18 м и 58 м (моделирование в Elcut), приведены в табл. 1.

Как видно из полученных значений, электрическая составляющая наведенного напряжения на любой частоте убывает по мере удаления от влияющего провода. На основной частоте на расстоянии 58 м даже электрическая составляющая наведенного напряжения превышает безопасный уровень, что объясняется небольшим расстоянием между линиями.

Таблица 1. Значения напряжения во влияющей и подверженной влиянию линиях

Table 1. Voltage values in the influencing and affected lines

Частота, Гц				
50 Гц	250 Гц	350 Гц	550 Гц	650 Гц
Напряжение гармоник на влияющем проводе, В				
27500	1346	590	384	311
Напряжение гармоник на подверженном влиянию проводе на расстоянии 18 м, В				
273	47	23	17	14
Напряжение гармоник на подверженном влиянию проводе на расстоянии 58 м, В				
60	11	6	4	3

Заключение

С помощью моделирования в программах SimInTech и Elcut осуществлена возможность рассмотрения совместного функционирования влияющих линий и объектов, подверженных влиянию. Программа SimInTech позволяет учесть распределенный характер параметров однофазных и трехфазных линий различного уровня питающих напряжений, несинусоидальность питающих напряжений и позволяет определить значения напряжения и тока в любой точке линий с учетом стационарных и нестационарных волновых процессов. В программе SimInTech в качестве примера построена динамическая модель энергосистемы, в которую вошли питающая линия электропередачи, тяговая сеть переменного тока напряжением 27,5 кВ и электровоз. Полученные в программе SimInTech значения напряжения и тока явились исходными данными для моделирования картины электромагнитного поля в программе Elcut. Результаты моделирования электрического и магнитного полей позволяют оценить визуально и численно интенсивность полей, их напряженности, значения наведенного напряжения в подверженном влиянию объекте, находящемся в заданном радиусе.

Предложенный способ моделирования в программах SimInTech и Elcut доказал свою работоспособность, так как полученные данные согласуются с результатами опубликованных исследований [7, 8].

Результаты моделирования по предложенной методике позволяют оценить электромагнитную совместимость влияющей линии с различными смежными устройствами и электронными объектами, которые находятся в области влияния электромагнитного поля.

Список источников / References

- Ковалева Т. В., Комяков А. А., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Имитационное моделирование электромагнитных процессов в тяговой сети // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск, 2022. С. 170–176. EDN: PUYGMU.
- Kovaleva T. V., Komyakov A. A., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Imitatsionnoye modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v tyagovoy seti [Simulation of electromagnetic processes in the traction network]. Pribory i metody izmereniy,

kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte. *Instruments and Methods of Measurement, Quality control and Diagnostics in Industry and Transport*. Omsk, 2022. P. 170–176. EDN: PUYGMU. (In Russ.).

2. Бадер М. П., Ермоленко Д. В., Куликов А. А. Защита линий продольного электроснабжения от электромагнитного влияния тяговой сети // *Электротехника*. 2024. № 9. С. 64–70. DOI: 10.53891/00135860-2024-9-64-70. EDN: LWENNC.

Bader M. P., Ermolenko D. V., Kulikov A. A. Zashchita liniy prodol'nogo elektrosnabzheniya ot elektromagnitnogo vliyaniya tyagovoy seti [Protection of longitudinal power supply lines from the electromagnetic influence of the traction network]. *Elektrotehnika. Electrotechnics*. 2024. No. 9. P. 64–70. DOI: 10.53891/00135860-2024-9-64-70. EDN: LWENNC. (In Russ.).

3. Ковалева Т. В., Комяков А. А., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Анализ волновых процессов в тяговой сети переменного тока на основе имитационного моделирования // *Транспорт Урала*. 2022. № 1 (72). С. 80–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. EDN: KCIPSY.

Kovaleva T. V., Komyakov A. A., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Analiz volnovykh protsessov v tyagovoy seti peremennogo toka na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Analysis of wave processes in alternating current traction power system on the basis of simulation modeling]. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). P. 80–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. EDN: KCIPSY. (In Russ.).

4. Feliziani M., Campi T., Cruciani S., Maradei F. Chapter 11. Electromagnetic compatibility of automotive WPT systems. *Wireless Power Transfer for E-Mobility*. Academic Press, 2024. P. 361–395. ISBN 9780323995238. DOI: 10.1016/B978-0-323-99523-8.00007-2.

5. Шныптев И. А., Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. [и др.]. Использование беспилотных летательных аппаратов для определения угла наклона железобетонных опор контактной сети // *Приборы*. 2024. № 5 (287). С. 37–43. EDN: FKGJIN.

Shnyptev I. A., Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Yu. [et al.]. Ispol'zovaniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya opredeleniya ugla naklona zhelezobetonnykh opor kontaktnoy seti [Using unmanned aerial vehicles to determine the angle of inclination of reinforced concrete supports of the overhead contact network]. *Pribory. Instruments*. 2024. No. 5 (287). P. 37–43. EDN: FKGJIN. (In Russ.).

6. Белоусов А. О., Носов А. В. Повышение помехозащитности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход // *Системы управления, связи и безопасности*. 2025. № 1. С. 10–47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047. EDN: OFHGJQ.

Belousov A. O., Nosov A. V. Povysheniye pomekhozashchishchennosti bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh vozdeystviya moshchnogo elektromagnitnogo izlucheniya: kompleksnyu podkhod [Enhancing the electromagnetic immunity of the unmanned aerial vehicle under high-intensity electromagnetic radiation: a comprehensive approach]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. Systems of Control, Communication and Security*. 2025. No. 1. P. 10–47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047. EDN: OFHGJQ. (In Russ.).

7. Гизатуллин Р. М., Дроздилов В. А., Константинов Э. С. Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линией электропередачи // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. № 4 (44). С. 13–21. EDN: PFNVYX.

Gizatullin R. M., Drozdikov V. A., Konstantinov E. S. Modelirovaniye funktsionirovaniya elementov elektronnykh sistem BPLA pri vozdeystvii izluchayemykh elektromagnitnykh pomekh vysokovol'tnoy liniyey elektroperedachi [Modeling the functioning of elements of electronic systems of a UAV under the influence of the radiated electromagnetic interference of a

high-voltage electric transmission line]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2019. No. 4 (44). P. 13–21. EDN: PFNVYX. (In Russ.).

8. Ниязов А. Р., Осипов Д. С., Шепелев А. О. Анализ воздействия электромагнитных полей на безопасность персонала и надежность полетов беспилотных летательных аппаратов при мониторинге линий электропередачи 110 кВ // *Вестник Югорского государственного университета*. 2024. Т. 20, № 1. С. 111–117. DOI: 10.18822/byusu202401111-118. EDN: BJNDHR.

Niyazov A. R., Osipov D. S., Shepelev A. O. Analiz vozdeystviya elektromagnitnykh poley na bezopasnost' personala i nadezhnost' poletov bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri monitoringe liniy elektroperedachi 110 kV [Analysis of the impact of electromagnetic fields on personnel safety and reliability of flights of unmanned aerial vehicles when monitoring 110 kV power lines]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. Yugra State University Bulletin*. 2024. Vol. 20, no. 1. P. 111–117. DOI: 10.18822/byusu202401111-118. EDN: BJNDHR. (In Russ.).

9. Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередач // *Известия Транссиба*. 2015. № 2 (22). С. 71–79. EDN: UDYIGN.

Kovaleva T. V., Pashkova N. V. Issledovaniye volnovykh protsessov v kontaktnoy seti i liniyakh elektroperedach [The wave processes study in the overhead system and power lines]. *Izvestiya Trancsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2015. No. 2 (22). P. 71–79. EDN: UDYIGN. (In Russ.).

10. Komyakov A., Tarasevich V., Bartel L. The Effectiveness Evaluation of Automatic Voltage Level Control in the Traction Network of AC Railways. *Proceedings 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 2024. P. 103–107. DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10719010.

11. Komyakov A., Nikiforov M., Tarasevich V., Bartel L. Booster Transformers Energy Performance Assessment in the Traction Power Supply System of Railway Transport. *8th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*. 2024. P. 3–10. DOI: 10.1007/978-981-97-6934-6_1.

12. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий: справ. Москва: Транспорт, 2001. 512 с.

Normativno-metodicheskaya dokumentatsiya po ekspluatatsii kontaktnoy seti i vysokovol'tnykh vozdushnykh liniy: sprav. [Regulatory and methodological documentation for the operation of a contact network and high-voltage overhead lines]. Moscow, 2001. 512 p. (In Russ.).

13. Залесова О. В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2014. Т. 17, № 1. С. 40–45. EDN: SBMZBH.

Zalesova O. V. Issledovaniye urovnya navedennogo napryazheniya na otklyuchennoy linii elektroperedachi, nakhodyashchaysya v zone vliyaniya tyagovoy seti zheleznoy dorogi peremennogo toka [Research of inducted voltage on disconnected transmission line in the interference zone of AC railway]. *Vestnik MG TU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik of MSTU*. 2014. Vol. 17, no. 1. P. 40–45. EDN: SBMZBH. (In Russ.).

14. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок: Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 903н (ред. от 29.04.2022). Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

Ob utverzhdenii Pravil po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok: Prikaz Mintruda Rossii ot 15.12.2020 № 903n (red. ot 29.04.2022) [On approval of the Rules for labor protection during the operation of electrical installations: Order of the Ministry of Labor of Russia dated 15.12.2020

КОВАЛЕВА Татьяна Владимировна, кандидат тех-
 нических наук, доцент (Россия), доцент кафедры
 «Теоретическая электротехника» Омского госу-
 дарственного университета путей сообщения (Ом-
 ГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 7545-0724

AuthorID (РИНЦ): 650721

ORCID: 0009-0006-2993-5215

AuthorID (SCOPUS): 57486213100

Адрес для переписки: tatevgeniy@list.ru

КОМЯКОВА Ольга Олеговна, кандидат технических
 наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретиче-
 ская электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1929-6266

AuthorID (РИНЦ): 517522

ORCID: 0009-0006-2806-979X

AuthorID (SCOPUS): 57485174000

Адрес для переписки: komyakovaoo@mail.ru

ПАШКОВА Наталья Викторовна, кандидат техни-
 ческих наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Те-
 оретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 9137-5016

AuthorID (РИНЦ): 650714

ORCID: 0009-0004-9538-7101

AuthorID (SCOPUS): 35389573700

Адрес для переписки: nvp78@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы
 не имеют финансовой заинтересованности в пред-
 ставленных материалах и методах. Конфликт инте-
 ресов отсутствует.

KOVALEVA Tatiana Vladimirovna, Candidate of
 Technical Sciences, Associate Professor, Associate
 Professor of the Theoretical Electrical Engineering
 Department, Omsk State Transport University (OSTU),
 Omsk.

SPIN-code: 7545-0724

AuthorID (RSCI): 650721

ORCID: 0009-0006-2993-5215

AuthorID (SCOPUS): 57486213100

Correspondence address: tatevgeniy@list.ru

KOMYAKOVA Olga Olegovna, Candidate of Technical
 Sciences, Associate Professor, Associate Professor of
 the Theoretical Electrical Engineering Department,
 OSTU, Omsk.

SPIN-code: 1929-6266

AuthorID (RSCI): 517522

ORCID: 0009-0006-2806-979X

AuthorID (SCOPUS): 57485174000

Correspondence address: komyakovaoo@mail.ru

PASHKOVA Natalia Viktorovna, Candidate of
 Technical Sciences, Associate Professor, Associate
 Professor of the Theoretical Electrical Engineering
 Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 9137-5016

AuthorID (RSCI): 650714

ORCID: 0009-0004-9538-7101

AuthorID (SCOPUS): 35389573700

Correspondence address: nvp78@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial
 interest in the presented materials or methods. There is
 no conflict of interest.

The article was submitted 28.05.2025; approved
 after reviewing 15.06.2025; accepted for publication
 25.06.2025.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PVSYSYSTEM

О. В. Косарева-Володько, Алилу Сани Маман Кабиру, Е. Н. Шафоростова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва

Среди возобновляемых источников энергии наиболее важным ресурсом является фотоэлектрическая солнечная энергия. Нигер, расположенный в самом сердце Сахеля, является одной из самых солнечных стран в мире со средним ежедневным количеством солнечного света от 5 до 7 кВт·ч/м²/день. Несмотря на этот огромный солнечный потенциал, страна недостаточно использует этот ресурс из-за роста цен на сырье, что привело к увеличению стоимости установки фотоэлектрической системы. Целью данной работы является представление технического и экономического анализа фотоэлектрической системы мощностью 11 МВт, подключенной к электрической сети в Нигере. Для выполнения данной работы использовалось программное обеспечение PVSyst для генерации экономических и финансовых данных с использованием таких методов, как Levelized Cost of Energy (приведенная стоимость электроэнергии). В ходе данной оценки были сделаны предположения: место установки свободное, налоги и пошлины при покупке и транспортировке оборудования не будут учитываться, срок службы проекта составляет 20 лет.

После моделирования получены следующие результаты: приведенная стоимость энергии составляет 0,0138 евро/кВт·ч; чистая приведенная стоимость составляет 26 430 389 евро; внутренняя норма доходности составляет 40,92 %; срок окупаемости составляет 2,8 года; доходность инвестиций составляет 606,2 %.

Ключевые слова: LCOE метод; экономическая оценка фотоэлектрической системы; технико-экономический анализ фотоэлектрической системы; фотоэлектрическая система, подключенная к электрической сети; солнечный потенциал; программное обеспечение PVSysystem.

Для цитирования: Косарева-Володько О. В., Алилу Сани Маман Кабиру, Шафоростова Е. Н. Экономическая оценка фотоэлектрической системы, подключенной к электрической сети при использовании программного обеспечения PVSysystem // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 51–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-51-59. EDN: DVSYSG.



© Косарева-Володько О. В., Алилу Сани Маман Кабиру, Шафоростова Е. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ECONOMIC EVALUATION OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING PVSYSYSTEM SOFTWARE

O. V. Kosareva-Volodko, Alilu Sani Maman Kabiru, E. N. Shaforostova

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

Among renewable energy resources, photovoltaic solar energy is the most important resource. For photovoltaic installation system, capturing the maximum solar energy is a challenge, because many factors influence the energy production of the system. Among these factors, there are: technology choice which is generally expensive, orientation of the panel, ambient temperature and weather, geographical location of the solar irradiances and the tilt angle. To carry out a good project for sizing photovoltaic system, a technical-economic study must be carefully done. Located in the heart of the Sahel, Niger is one of the sunniest countries in the world with an average daily sunshine between 5 and 7 kW·h/m²/day. Despite this enormous solar potential, the country does not sufficiently exploit this resource due to the increase in the price of raw materials which has led to an increase in the cost of installing a photovoltaic system. The objective of this work is to present a technical and economic analysis of a grid connected

photovoltaic system in with a capacity of 11 MW in Niger. To do this work, PVsystem software was used for economical and financial data generation using methods like Levelized cost of electricity. During this evaluation, assumptions were made: the location of installation is free, taxes and duties during the purchase and transport of the equipment will not be considered and considering the start year of the project began in 2024 and the project lifetime is 20 years, after simulation of the results obtained: Levelized Cost of Energy is 0.0138 EUR/KW · h; Net present Value is 26 430 389 EUR; Internal rate of return is 40.92 %; Payback period is 2.8 Years; Return on investment is 606.2 %.

Keywords: LCOE method, economic evaluation of photovoltaic system, technical and economic analysis, photovoltaic system, grid connected photovoltaic system, solar potential, PVSystem software.

For citation: Kosareva-Volodko O. V., Alilu Sani Maman Kabiru, Shaforostova E. N. Economic evaluation of a grid-connected photovoltaic system using PVsystem software. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 51–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-51-59. EDN: DVSYSG.



© Kosareva-Volodko O. V., Alilu Sani Maman Kabiru, Shaforostova E. N., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Фотоэлектрическая (PV) энергия — это чистая и бесплатная энергия, получаемая в результате прямого преобразования солнечного света в электричество фотоэлектрическим элементом посредством фотоэлектрического эффекта. Фотоэлектрическая технология в основном используется для освещения, отопления и производства электроэнергии. С точки зрения производства электроэнергии, эта технология используется для различных целей, таких как солнечная насосная установка для орошения, животноводства или производства питьевой воды [1–3]. Хотя эта технология пока еще дорогая, ее развитие в мире растет стремительными темпами с каждым годом [4, 5]. Рост популярности фотоэлектрических технологий обусловлен простотой их конструкции и практической реализации, экологичностью и меньшей потребностью в обслуживании [6, 7]. В отчете SolarPower Europe 2024 чистая мощность производства солнечной энергии, подключенная к мировой электросети в 2023 году, составляет 447 ГВт (78 % от 576 ГВт) новых мощностей возобновляемой энергии по сравнению с 66 % в 2022 году и 56 % в 2021 году. Эти результаты подтверждают роль фотоэлектрической солнечной энергетики как лидера в глобальном энергетическом переходе [7, 8].

В настоящее время жить без электричества очень сложно, поскольку основные виды социально-экономического развития требуют электроэнергии. Люди оснащают свои дома системами бесперебойного питания, такими как инверторы, чтобы преодолеть проблему отключения электроэнергии от основной электросети [8–11]. В развитых странах, таких как Россия или Китай, смешивание энергии является идеальным решением при возникновении проблемы перебоев в подаче электроэнергии [11]. В развивающихся странах, особенно в отдаленных районах, где отсутствует электросеть, население использует солнечные батареи для производства и хранения электроэнергии [12]. В странах Западной Африки, в частности в Нигере, где самый низкий уровень доступа к электричеству, принята государственная политика по обеспечению отдаленных районов электроэнергией за счет возобновляемых источников энергии, в частности солнечной фотоэлектрической энергии [13]. С ростом цен на сырье, что приводит к росту стоимости фотоэлектрических установок, необходимо провести тща-

тельное техническое и экономическое исследование. В данной работе представлено экономическое обоснование сетевой фотоэлектрической системы в Нигере.

Производство электрической энергии в Нигере

Нигер является одной из наименее электрифицированных в Африке. Такая ситуация обусловлена такими проблемами страны, как отсутствие безопасности, бедность, коррупция, климат и большая территория, которые препятствуют развитию электроэнергетического сектора Нигера. При уровне доступа к электроэнергии в 20 % в 2022 году большинство домохозяйств, подключенных к национальной электросети, расположены в столице Ниамее и регионах Доссо и Тиллабери. Согласно исследованию 2020 года, проведенному Центром энергетики и климата IFRI, потребление электроэнергии в Нигере оценивается в 1450 гигаватт-часов (ГВт·ч), из которых более 75 %, оцениваемых в 1107 ГВт·ч, импортируется из Нигерии. Что касается местного или национального производства, то оно обеспечивается: Niger Electricity Company (NIGELEC) — 269 ГВт·ч и Niger Coal Mining (SONICHAR) — 64,5 ГВт·ч. Но с середины 2021 года в рамках 15-летнего партнерства (ГЧП) BOOT (Build, Own, Operate and Transfer) в Нигер поставляется электроэнергия, производимая тепловыми электростанциями мавританской компании Isthmar Zest Africa, которые производят и продают электроэнергию NIGELEC. К этому добавлено производство электричества фотоэлектрическими мини-станциями, установленными по всей стране, число которых оценивается в 127 шт. в соответствии с докладом Министерства энергетики Нигера. Тем не менее другие проекты построения мини-фотоэлектрических электростанций необходимы, чтобы обеспечить доступ к электроэнергии в районах, не связанных с национальной электрической сетью. На рис. 1, 2 отражены соответственно показатели доступа к энергетическим услугам и производство электроэнергии источниками в Нигере с 2010 по 2022 год.

Мировая глобальная эволюция производства фотоэлектрической энергии

В связи с ростом спроса на электроэнергию во всем мире использование возобновляемых источников энергии увеличивается с каждым годом.

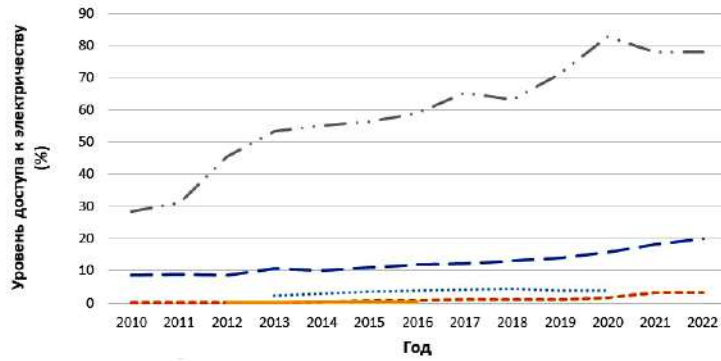


Рис. 1. Показатели доступа к энергетическим услугам:
 — уровень доступа к электричеству в стране, (%);
 — уровень доступа к электричеству в городах, (%);
 — домохозяйства, использующие сжиженный нефтяной газ для приготовления пищи, (%);
 — уровень доступа к электричеству в сельской местности, (%);
 — домохозяйства, использующие электричество для приготовления пищи, (%)

Fig. 1. Indicators of access to energy services:
 — national electricity access rate, (%);
 — urban electricity access rate, (%);
 — households using LPG for cooking, (%);
 — rural electricity access rate, (%);
 — households using electricity for cooking, (%)

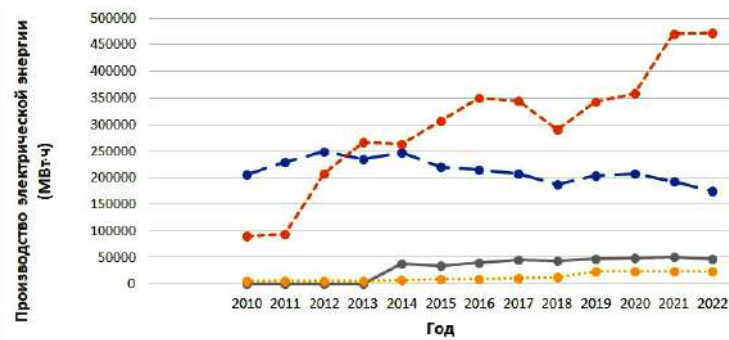


Рис. 2. Производство электрической энергии (МВт·ч):
 — минеральный уголь; — сырая нефть и нефтепродукты;
 — природный газ; — солнечные батареи

Fig. 2. Production of electrical energy (MW·h):
 — mineral coal; — crude oil and petroleum products;
 — natural gas; — solar panels

Фотоэлектрическая солнечная энергия занимает важное место в мировом производстве электроэнергии. Массовое использование фотоэлектрической солнечной энергии объясняется тем, что эта энергия отвечает целям устойчивого развития и играет решающую роль в энергетическом балансе [14, 15]. В результате многие страны приняли политику, направленную на внедрение фотоэлектрической солнечной энергии для производства электричества, чтобы решить еще одну важную проблему, а именно защитить окружающую среду от выбросов парниковых газов.

В настоящее время наиболее широко используемыми фотоэлектрическими технологиями являются: поликристаллические (p-Si), монокристаллические (m-Si) и аморфные (a-Si). В настоящее время, благодаря своей надежности, кристаллические фотоэлектрические солнечные модули занимают около 90 % рынка солнечных технологий в мире [16, 17]. В докладе World Energy Outlook 2020 «Сценарий Net Zero Emission by 2050» прогнозируется, что установленная мощность производства солнечной

фотоэлектрической энергии в мире в 2025 году составит около 1840 ГВт·ч и увеличится до 3929 ГВт·ч к 2030 году. В этом контексте солнечная фотоэлектрическая энергия обеспечит 5420 ТВт·ч, или 15,9 % мировой энергии.

На рис. 3 показана эволюция установленной мощности солнечной энергии во всем мире с 2010 по 2022 год [18, 19].

Структура солнечной фотоэлектрической установки, подключенной к электрической сети

Фотоэлектрическая установка без накопителя электроэнергии, напрямую подключенная к электросети в течение дня, состоит из фотоэлектрического генератора, который улавливает солнечное излучение и преобразует его в электричество благодаря фотоэлектрическому эффекту; преобразователя постоянного тока в переменный; контроллера МРРТ (Maximum Power Point Tracking), повышающего трансформатора переменного тока и точки ввода в электросеть. Упрощенная структура этой установки показана на рис. 4.

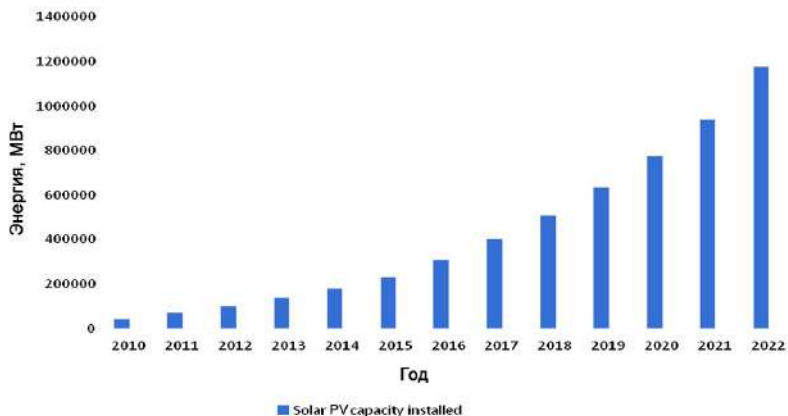


Рис. 3. Установленная мощность солнечных фотоэлектрических установок в мире с 2010 г. по 2022 г. [17, 18]

Fig. 3. Installed capacity of solar PV installations in the world from 2010 to 2022 [17, 18]



Рис. 4. Упрощенная структура солнечной фотоэлектрической установки без накопителя, подключенной к электрической сети

Fig. 4. Simplified structure of a solar PV installation without storage, connected to the grid, used directly during the day



Рис. 5. Структура экономической оценки сетевой фотоэлектрической установки с использованием программного обеспечения PVSystem

Fig. 5. Structure of economic evaluation of grid-connected PV installation using PVSystem software

Описание экономической и технической оценки фотоэлектрической установки, подключенной к электрической сети с использованием программного обеспечения PVSystem

Экономическая и техническая оценка сетевой фотоэлектрической системы является важным шагом, который должен быть выполнен с особым вниманием, поскольку он состоит из определения

инвестиционных затрат на установку, финансовых параметров, продажи электроэнергии, финансовых результатов и баланса углерода. Для выполнения этой работы используется программное обеспечение PVSystem, предназначенное для проектирования и моделирования проектов фотоэлектрической солнечной энергетики. На рис. 5 показана структура экономической оценки сетевой фотоэлектрической установки с использованием программного обеспечения PVsystem.

Инвестиционные затраты на установку

Инвестиционные затраты на установку включают в себя покупку оборудования, рабочую силу для установки оборудования, налоги, пошлины и покупку земли.

В этом случае, когда земля, на которой будет располагаться установка, рассматривается как приобретение, налоги и пошлины на покупку оборудования не будут учитываться.

Финансовые параметры включают: продолжительность проекта, инвестиции, собственный капитал, гранты и кредиты.

Продажа электроэнергии

Этот шаг объединяет метод ценообразования и тариф на выкуп электроэнергии. Метод ценообразования считается фиксированным, а тариф на выкуп электроэнергии составляет 0,11 евро/кВт·ч.

Углеродный баланс

Углеродный баланс относится к разнице между выбросами углерода и секвестрацией углерода в системе. Углеродный баланс фотоэлектрической установки также позволяет предсказать количество выбросов парниковых газов, которые следует избегать.

Экономика

Включает инвестиционные затраты на установку, финансовые параметры, доходность инвестиций (ROI — Return on Investment), срок окупаемости (payback period), чистую приведенную стоимость (NPV — Net Present Value), внутреннюю норму доходности (IRR — Internal Rate of Return) и приведенную стоимость энергии (LCOE — Levelized Cost of Energy).

$$ROI = \frac{CVI - CI}{CI}, \quad (1)$$

где CVI (Current Value of Investment) — текущая стоимость инвестиций;

CI (Cost of Investment) — стоимость инвестиций;

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{A}{(1+S)^t}, \quad (2)$$

где A — приток денежных средств — отток в течение одного периода (cash inflow — outflows during a single period);

S — ставка дисконтирования (discount rate);

t — количество периодов времени (number of time periods).

Формула для определения IRR выглядит следующим образом:

$$0 = NPV + \sum_{t=1}^n \left(\frac{B}{(1+IRR)_t} - C \right), \quad (3)$$

где B — чистый приток денежных средств за период t (net cash inflow during period t); C — общая сумма первоначальных инвестиций (total initial investment).

Что касается энергетического проекта, то норма общей выработки электроэнергии системой в течение всего срока ее службы называется приведенной стоимостью энергии $LCOE$.

Формула для определения $LCOE$ выглядит следующим образом:

$$LCOE = D + \sum_{t=1}^n \left(\frac{\frac{Z}{(1+J)^t}}{L} \right) \dots, \quad (4)$$

где D — инвестиционные расходы в евро (investment expenditure in EUR);

Z — общая годовая стоимость в евро в год t (annual total cost in EUR per year t);

t — срок действия проекта (year of project lifetime), где t — год;

L — объем произведенной электроэнергии, в кВт·ч в год (produced amount produced of electricity in KW·h per year);

J — реальная годовая процентная ставка в % (real annual interest rate in %);

n — экономическая продолжительность жизни в годах (economic lifetime in years).

Методология

В заключение нужно отметить, чтобы получить мощность 11 МВт, будет использован метод, приведенный в статье [20], то есть создается проектная и имитационная модель подсистемы мощностью 800 кВт в среде программного обеспечения PVSystem, а затем умножается на 14, чтобы получить мощность 11 МВт. Разработанная модель будет состоять из 29120 фотоэлектрических панелей мощностью 385 Вт каждая (включая 211 кВт запас прочности, учитывающий неблагоприятные погодные условия, такие как облачное небо и экстремальные температуры, которые влияют на производительность фотоэлектрических панелей, а также с учетом собственного потребления (self-consumption)), 133 инверторов MPPT мощностью 66 кВт переменного тока каждый и трансформатора среднего напряжения мощностью 11 МВт. В табл. 1 показаны инвестиции и расходы проекта [20].

Результаты и обсуждение

Тарифный режим считается фиксированным, а тариф на покупку электроэнергии составляет 0,11 евро/кВт·ч. После моделирования были получены следующие результаты: системная и финансовая информация представлена в табл. 2, подробные экономические результаты показаны в табл. 3, другие результаты представлены в графической форме на рис. 6–9.

Анализ табл. 2 и 3 показывает следующие результаты.

В табл. 2 представлена не только техническая информация о системе, а именно тип используемой фотоэлектрической системы, количество энергии, вырабатываемой фотоэлектрической системой и количество предотвращенных выбросов парниковых газов, но и финансовая информация о проекте на протяжении всего срока его службы.

В то время как табл. 3 содержит подробную финансовую информацию о проекте, касающуюся кредитов, продажи энергии, налогов, пошлин и т. д.

Рис. 6 представляет нормализованные факторы производства и потерь и показывает, что 66 % произведенной энергии используется, т. е. вводится в электросеть, 3,3 % представляют потери, связанные с системой, и 30,8 % потерь связаны с фотоэлектрическими коллекторами, которые не могут уловить максимальное количество солнечного излучения. Что касается анализа рис. 7, он показыва-

Таблица 1. Инвестиции и расходы
 Table 1. Investment and charges

Фотоэлектрические модули / PV modules	Quantity (Количество)	Unit price (Цена за единицу), EUR	Total price (Общая цена), EUR
TSM-DE IS H-(II)-385	29 120	100	2 912 000
Поддержка модулей / Supports modules	29 120	50	1 456 000
Solar inverter M80H 400V AC	133	3 500	465 500
Стоимость установки / Installation cost	—	—	303 530
Другие компоненты / Others components	—	—	599 400
Исследования и анализы / Studies and analysis	—	—	8 000
Страхование / Insurance	—	—	0
Стоимость земли / Land costs	—	—	0
Сборы за кредит / Loan bank charges	—	—	0
Налоги / Taxes	—	—	0
Ежегодные эксплуатационные расходы / Operating costs yearly	—	—	94 100
Общая стоимость установки / Total installation costs	—	—	5 744 430

Таблица 2. Системная и финансовая информация
 Table 2. System and financial information

Название проекта / Project name	Система, подключенная к сети / Grid-connected PV System
Номинальная мощность массива фотоэлектрических систем, кВт·ч / PV Array nominal capacity, KW·h	11211
Произведенная энергия, МВт·ч/год / Produced Energy, MW·h/Year	16088
Стоимость установки, евро / Installation costs, EUR	5 278 930
Общая годовая стоимость, евро/год / Total yearly cost, EUR/Year	38 909,90
Нормированная стоимость электроэнергии, евро/кВт·ч / Levelized Cost of Energy (LCOE), EUR/KW·h	0,0138
Чистая приведенная стоимость, евро / Net Present Value (NPV), EUR	26 430 389
Продолжительность проекта, в годах / Project lifetime, Years	20
Год начала / Start year	2025
Внутренняя норма доходности / Internal Rate of Return (IRR)	40,92 %
Срок окупаемости, к годам / Payback period, Years	2,8
Доходность инвестиций / Return on investment (ROI), %	606,2
Сокращение выбросов CO ₂ , т. / Saved CO ₂ emissions, tons	3800,220

Normalized Production and Loss Factors: Nominal power 11.21 MWp

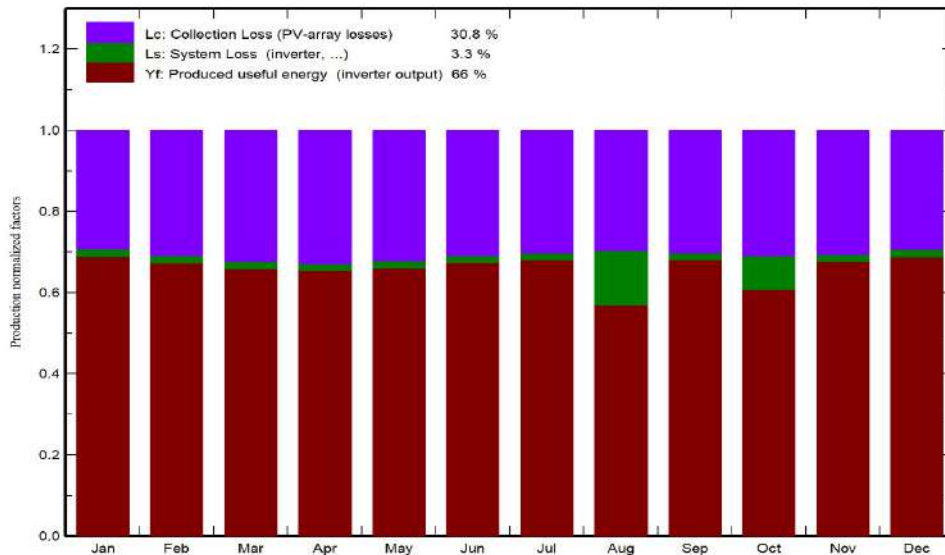


Рис. 6. Нормализованные коэффициенты добычи и потерь
 Fig. 6. Normalized production and loss ratios

ет колебания в распределении напряжения фотоэлектрического поля. Это колебание напряжения можно объяснить тем фактом, что фотоэлектрическая солнечная энергия является прерывистой из-за определенных параметров, таких как пыль, снег, облака и т. д.

Анализ рис. 8 и 9 показывает, что:

— годовой денежный поток отрицателен с 2024 года инвестирования в ходе реализации проекта, но с 2025 по 2044 год, когда проект находится в эксплуатации, годовой денежный поток остается постоянным;

— накопленный денежный поток отрицателен и его значение уменьшается между 2024 и 2026 го-

Таблица 3. Подробные экономические результаты
 Table 3. Detailed economic results

Год	<i>Es</i>	<i>Of</i>	<i>Lp</i>	<i>Li</i>	<i>Rc</i>	<i>Da</i>	<i>Ti</i>	<i>T</i>	<i>Atp</i>	<i>Cp</i>	<i>A</i> , %
0	1 776 715	4 000 000	0	0	0	0	0	0	0	- 4 000 000	0,0 %
1	1 776 715	0	33 809	7 444	94 100	270 795	1 404 376	210 656	1 430 706	- 2 569 294	30 %
2	1 776 715	0	34 147	7 106	94 100	270 795	1 404 314	210 707	1 430 655	- 1 138 638	61,7 %
3	1 776 715	0	34 488	6 765	94 100	270 795	1 405 056	210 758	1 430 604	291 966	92,6 %
4	1 776 715	0	34 833	6 420	94 100	270 795	1 405 400	210 810	1 430 552	1 722 518	123,5 %
5	1 776 715	0	35 181	6 072	94 100	270 795	1 405 749	210 862	1 430 500	3 153 018	154,4 %
6	1 776 715	0	35 533	5 720	94 100	270 795	1 406 101	210 915	1 430 447	4 583 466	185,3 %
7	1 776 715	0	35 888	5 364	94 100	270 795	1 406 456	210 968	1 430 394	6 013 860	216,2 %
8	1 776 715	0	36 247	5 006	94 100	270 795	1 406 815	211 022	1 430 340	7 444 200	247,1 %
9	1 776 715	0	36 610	4 643	94 100	270 795	1 407 177	211 077	1 430 288	8 874 486	278,0 %
10	1 776 715	0	36 976	4 277	94 100	270 795	1 407 543	211 132	1 430 231	10 304 717	309,0 %
11	1 776 715	0	37 346	3 907	94 100	270 795	1 407 913	211 187	1 430 176	11 734 893	339,9 %
12	1 776 715	0	37 719	3 534	94 100	270 795	1 408 287	211 243	1 430 120	13 165 012	370,8 %
13	1 776 715	0	38 096	3 157	94 100	270 795	1 408 664	211 300	1 430 063	14 595 075	401,8 %
14	1 776 715	0	38 477	2 776	94 100	270 795	1 409 045	211 357	1 430 006	16 025 081	432,7 %
15	1 776 715	0	38 862	2 391	94 100	270 795	1 409 430	211 414	1 429 948	17 455 029	463,7 %
16	1 776 715	0	39 251	2 002	94 100	270 795	1 409 818	211 473	1 429 890	18 884 919	294,7 %
17	1 776 715	0	39 643	1 610	94 100	270 795	1 410 211	211 532	1 429 831	20 314 750	525,6 %
18	1 776 715	0	40 040	1 213	94 100	270 795	1 410 607	211 591	1 429 771	21 744 521	556,6 %
19	1 776 715	0	40 440	813	94 100	270 795	1 411 008	211 651	1 429 711	23 174 233	587,6 %
20	1 776 715	0	40 844	408	94 100	270 795	1 411 412	211 712	1 429 651	24 603 884	618,6 %

Es (Electricity sale) — стоимость продаваемой электроэнергии; *Li* (Loan interest) — проценты по кредиту; *Ti* (Taxable income) — налогооблагаемый доход; *Of* (Owns funds) — собственные денежные средства; *Rc* (Run costs) — затраты на запуск; *T* (Taxes) — налоги; *Lp* (Loan principal) — величина кредита; *Da* (Depreciation allow) — разрешенная амортизация; *Atp* (After tax profit) — чистая прибыль после уплаты налогов; *Cp* (Cumulated profit) — кумулятивная прибыль; *A* (Depreciation in percentage) — амортизация в %.

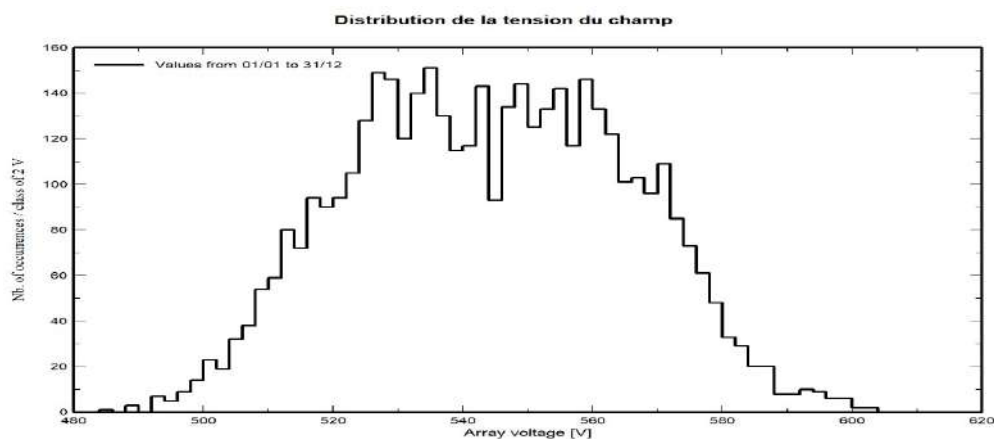


Рис. 7. Распределение напряжения на фотоэлектрическом поле
 Fig. 7. Voltage distribution on the photovoltaic field

дами, но с 2027 по 2044 год его значение положительно и быстро увеличивается.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что проект может приносить прибыль и вложения быстро окупятся.

Заключение

В данном исследовании был проведен технико-экономический анализ установки фотоэлектрической электростанции мощностью 11 МВт, подключенной к национальной электросети Нигера, в среде программного обеспечения PVSystem.

В ходе экономической оценки проекта были рассмотрены не только финансовые инвестиции, необходимые для реализации проекта, но и годовые расходы на обслуживание системы. Согласно полученным результатам моделирования, доходность инвестиций составляет 606,2 %, а период окупаемости — 2,8 года.

Другим моментом является экологическая составляющая.

Применение солнечных панелей поможет сократить количество парниковых газов, которое составляет около 3800,22 тонны CO₂.

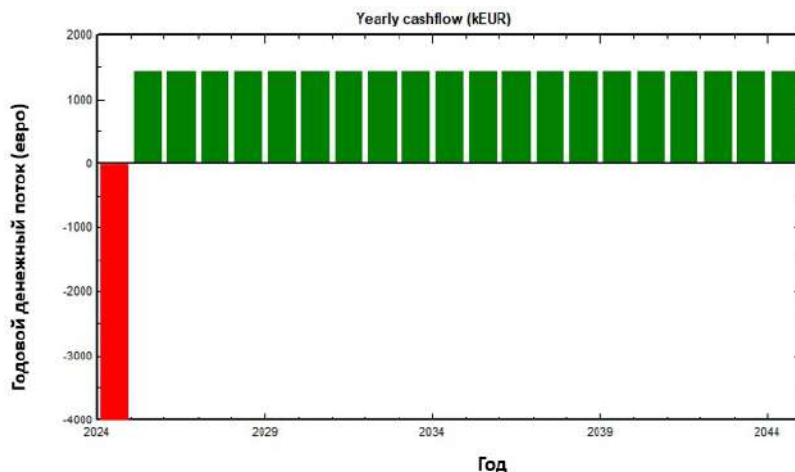


Рис. 8. Годовой денежный поток
 Fig. 8. Annual cash flow

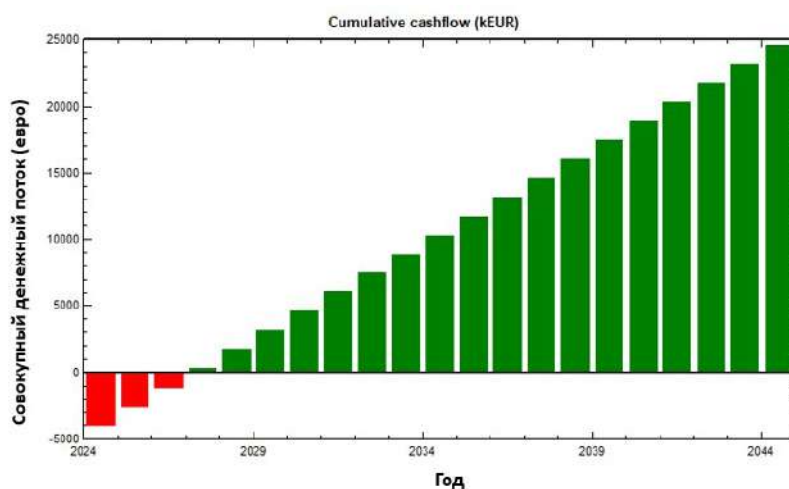


Рис. 9. Совокупный денежный поток
 Fig. 9. Total cash flow

Можно сделать вывод, что, с одной стороны, разработанный проект является прибыльным, а с другой — показывает эффективность, наглядность, а также доступность и простоту использования программного обеспечения PVSystem при реализации проектов фотоэлектрической солнечной энергетики.

Список источников / References

1. Bediar S., Harrouz A., Belatrache D. Design and simulation of solar pumping system using PVsyst, case study: TSABIT-ADRAR in Algeria. *Algerian Journal of Signals and Systems*. 2024. Vol. 9 (2). P. 47–56. DOI: 10.51485/ajss.v9i2.210.
2. Li G., Jin Y., Akram M. W., Chen, X. Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 79. P. 440–458. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.055.
3. Sharma R., Sharma S., Tiwari S. Design optimization of solar PV water pumping system. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 21 (3). P. 1673–1679. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.322.
4. Baddou Y. Solar thermal systems for domestic water heating applications in residential buildings. Efficiency and economic viability analysis of monitored plants: Master thesis in Renewable Energies and Energy Efficiency. 2017. 47 p.

5. Halder P. K. Potential and economic feasibility of solar home systems implementation in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. P. 568–576. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.062.
6. Milosavljević D. D., Kevkić T. S., Jovanović S. J. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*. 2022. Vol. 20, Issue 1. P. 431–451. DOI: 10.1515/phys-2022-0042.
7. Schmela M. Global Market Outlook for Solar Power 2024–2028. SolarPower Europe. 2024. 148 p. ISBN 9789464669169. URL: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2024-2028/detail> (accessed: 12.02.2025).
8. Akshai K. N. B., Senthil R. Economic evaluation of grid connected and standalone photovoltaic systems using PVsyst. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 912 (4). DOI: 10.1088/1757-899X/912/4/042074.
9. Emeara M. S., AbdelGawad A. F., Ahmed E. H. Hybrid Renewable Energy System for a Sustainable House-Power-Supply. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021. Vol. 87 (1). P. 91–107. DOI: 10.37934/arfmts.87.1.91107.
10. Sancar M. R., Bayram A. B. Modeling and Economic Analysis of Greenhouse Top Solar Power Plant with PVsyst Software. *International Journal of Engineering and Innovative Research*. 2023. Vol. 5 (1). P. 48–59. DOI: 10.47933/ijeir.1209362.

11. Шикин В., Бандари А. Российско-индийское сотрудничество в области энергетики: торговля, совместные проекты, новые сферы: моногр. Москва: Некоммерческое партнерство «Российский совет по международным делам», 2017. 16 с.

Shikin V., Bandari A. Rossiysko-indiyskoye sotrudnichestvo v oblasti energetiki: torgovlya, sovmestnyye proyekty, novyye sfery [Russia – India energy cooperation: trade, joint projects, and new areas]. Moscow, 2017. 16 p. (In Russ.).

12. Ibegbulam Ch., Adeyemi O. O., Fogbonjaiye O. C. Adoption of Solar PV in Developing Countries: Challenges and Opportunity. *International Journal of Physical Sciences Research*. 2023. DOI: 10.37745/10.37745/ijpsr.17/vol7n13657.

13. Niger: Atténuation des risques des investissements dans les énergies renouvelables. URL: <https://africaminigrids.org/wp-content/uploads/2023/12/DREI-Niger-Resultats-Complets-Mars-2023.pdf> (accessed: 12.02.2025).

14. Bortolini M., Gamberi M., Graziani A., Mora C. [et al.]. Multi-parameter analysis for the technical and economic assessment of photovoltaic systems in the main European Union countries. *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 74. P. 117 – 128. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.04.035.

15. Elomari Y., Norouzi M., Marín-Genescà M., Fernández A. [et al.]. Integration of Solar Photovoltaic Systems into Power Networks: A Scientific Evolution Analysis. *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (15). 9249. DOI: 10.3390/su14159249.

16. Zsiborács H., Baranyai N. H., Csányi S., Vincze A. [et al.]. Economic analysis of grid-connected PV system regulations: A Hungarian case study. *Electronics*. 2019. Vol. 8 (2). 149. DOI: 10.3390/electronics8020149.

17. Cristea C., Cristea M., Birou I., Tornovan R-A. Economic assessment of grid-connected residential solar photovoltaic systems introduced under Romania's new regulation. *Renewable Energy*. 2020. DOI : 10.1016/j.renene.2020.07.130.

18. SolarPower Europe (2022): Perspectives du marché mondial de l'énergie solaire 2022–2026. 116 p. ISBN 9789464518610.

19. SolarPower Europe (2023): Global Market Outlook for Solar Power 2023–2027. URL: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail> (accessed: 12.02.2025).

20. Косарева-Володько О. В., Алилу Сани Маман Кабир. Проектирование и моделирование фотоэлектрических систем с помощью программного обеспечения PVsystem // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 91–99. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-91-99. EDN: CEQYVR.

Kosareva-Volodko O. V., Alilu Sani Maman Kabiru. Proyektirovaniye i modelirovaniye fotoelektricheskikh sistem s pomoshch'yu programmnoy obeshcheniya PVsystem [Design and simulation of photovoltaic systems using PVsystem software]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 91 – 99. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-91-99. EDN: CEQYVR. (In Russ.).

КОСАРЕВА-ВОЛОДЬКО Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (Университет МИСИС), г. Москва.

SPIN-код: 9100-5274

AuthorID (РИНЦ): 352831

AuthorID (SCOPUS): 57207833888

Адрес для переписки: kosareva-volodko@rambler.ru

АЛИЛУ САНИ МАМАН КАБИРУ, аспирант кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности Университета МИСИС, г. Москва.

ORCID: 0009-0001-6656-7961

Адрес для переписки: halilousani4@gmail.com

ШАФОРОСТОВА Елена Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия), доцент кафедры автоматизированных систем управления Университета МИСИС, г. Москва.

SPIN-код: 8033-2783

AuthorID (РИНЦ): 776611

Адрес для переписки: shaf-elena@yandex.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

KOSAREVA-VOLODKO Olga Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry Department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow.

SPIN-code: 9100-5274

AuthorID (RSCI): 352831

AuthorID (SCOPUS): 57207833888

Correspondence address: kosareva-volodko@rambler.ru

ALILU SANI MAMAN KABIRU, Postgraduate at the Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry Department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow.

ORCID: 0009-0001-6656-7961

Correspondence address: halilousani4@gmail.com

SHAFOROSTOVA Elena Nikolaevna, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Controlled Management Systems Department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow.

SPIN-code: 8033-2783

AuthorID (RSCI): 776611

Correspondence address: shaf-elena@yandex.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 17.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СУДОВЫХ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

В. В. Миханошин¹, А. Ф. Бурков², А. Ю. Филоженко¹

¹Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Преимущества гребных электрических установок способствуют их применению на судах и кораблях морского флота — ледоколах, паромах, буксирах, крейсерах и др., которым необходима повышенная маневренность и живучесть. Одним из существенных недостатков гребных электрических установок, ограничивающих их более широкое применение, является пониженный, по сравнению с прямой передачей вращающего момента главного приводного двигателя на гребной винт, коэффициент полезного действия. Кроме того, по сравнению с другими вариантами пропульсивных установок гребные электрические установки занимают больше внутреннего пространства судна. Также актуальными являются вопросы, касающиеся повышения надежности гребных электрических установок. Если в береговых электроэнергетических системах наибольшее распространение получила трехфазная система электроснабжения благодаря экономичности передачи электроэнергии на большие расстояния, то на электроходах ввиду значительно меньших расстояний между источниками (главными генераторами) и основными электропотребителями (гребными электродвигателями) представляется целесообразным применение систем электроснабжения с числом фаз, большим трех. В статье на основе выполненного анализа существующих типов предложена новая конструкция электрических машин с несколькими встроенными друг в друга статорно-роторными парами, защищенная патентом на изобретение. Применение таких машин на электроходах, сердечники статора которых снабжены при этом многофазными обмотками (с числом фаз больше трех), позволит решить вышеуказанные задачи.

Ключевые слова: многофазная обмотка, надёжность, полупроводниковый преобразователь, рабочее состояние, электрическая машина, энергоэффективность.

Для цитирования: Миханошин В. В., Бурков А. Ф., Филоженко А. Ю. Применение мощных многофазных электрических машин в судовых гребных электроустановках // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 60–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-60-65. EDN: GEZWIK.



© Миханошин В. В., Бурков А. Ф., Филоженко А. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF POWERFUL MULTIPHASE ELECTRIC MACHINES IN MARINE ROWING ELECTRIC INSTALLATIONS

V. V. Mikhanoshin¹, A. F. Burkov², A. Yu. Filozhenko¹

¹Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

The advantages of electric propulsion systems contribute to their use on ships and ships of the navy — icebreakers, ferries, tugboats, cruisers, etc., which require increased maneuverability and survivability. One of the significant disadvantages of electric propulsion systems, limiting their wider application, is the reduced efficiency compared to the direct transmission of the torque of the main drive motor to the propeller. In addition, compared to other variants of propulsive installations, rowing electric installations occupy more of the interior space of the vessel. Issues related to improving the reliability of electric propulsion systems are also relevant. If the three-phase power supply system is most widespread in coastal electric power systems, due to the cost-effectiveness of transmitting electricity over long distances, then on electric ships, due to the much shorter distances between sources (main generators) and main electric consumers (rowing electric motors), it seems advisable to use power supply systems with a number of phases greater than three. Based on the analysis of existing types, a new design of electric machines with several stator-rotor pairs integrated into each other, protected by a patent for the invention, is proposed. The use of such machines on electric

drives, the stator cores of which are equipped with multiphase windings (with more than three phases), will solve the above tasks.

Keywords: multiphase winding, reliability, semiconductor converter, working condition, electric machine, energy efficiency.

For citation: Mikhanoshin V. V., Burkov A. F., Filozhenko A. Yu. Application of powerful multiphase electric machines in marine rowing electric installations. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 60–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-60-65. EDN: GEZWIK.



© Mikhanoshin V. V., Burkov A. F., Filozhenko A. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Традиционным, наиболее эффективным способом повышения надежности оборудования в судовых электроэнергетических системах, является резервирование. Например, в гребных электрических установках (ГЭУ) постоянного тока в качестве электромеханических преобразователей применяются двухъякорные гребные электродвигатели (ГЭД) и несколько главных генераторов. Известны также двухстаторные асинхронные ГЭД, содержащие на каждом из статоров одинаковые трёхфазные обмотки. Выполненные на основе таких ГЭД пропульсивные установки сохраняют свое рабочее состояние при выходе из строя одной якорной (статорной) обмотки. К относительно новым способам повышения надежности электрических машин (ЭМ) следует отнести их многофазное исполнение [1–3]. При этом, в отличие от трехфазных, такие ЭМ сохраняют свое рабочее состояние в случаях выхода из строя одной или даже двух фаз. Кроме того, их внедрение, в частности в ГЭУ систем «дизель-генератор — преобразователь частоты — ГЭД», позволит получить следующие основные преимущества:

- меньшую амплитуду пульсаций входного тока инвертора, благодаря чему снижаются пульсационные потери в звене постоянного тока и, соответственно, требуется меньший по массо-размерным показателям сглаживающий фильтр в звене постоянного тока;

- больший электромагнитный момент ГЭД и, соответственно, большую номинальную мощность, которые прямо пропорциональны числу его фаз;

- уменьшение пульсаций крутящего момента ГЭД при увеличении числа фаз [4];

- лучшую форму (синусоидальность) магнитодвижущей силы в воздушном зазоре, преимущественно в машинах с нечётным количеством фазных обмоток, повышая тем самым коэффициент полезного действия (КПД) этих ЭМ и ГЭУ в целом [5];

- возможность использования для статорных обмоток проводников меньшего сечения благодаря снижению фазных токов ЭМ;

- меньшую токовую нагрузку на силовые полупроводниковые приборы (ключи) в схемах многофазных выпрямителей и инверторов;

- повышенную надёжность, обусловленную многофазностью ГЭД [6].

Например, при выходе из строя одной фазы 17-фазной ЭМ её мощность снизится на 6 %, а мощность работающей на двух фазах трёхфазной машины уменьшится на 33,3 % относительно номинальной мощности.

Несмотря на ряд публикаций [1–3], посвященных разработке теории многофазных ЭМ, а также

вышеперечисленные их преимущества по сравнению с трёхфазными, последние продолжают использоваться практически повсеместно, в том числе и мощных: генераторных агрегатах и судовых электроприводах (ГЭУ, якорно-швартовых и грузоподъемных механизмов, подруливающих устройств, траловых лебедок и др.) [7].

Необходимость совершенствования мощных судовых ЭМ с целью повышения их надежности и энергетических характеристик отражена, в частности, в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 года № 3363-р, в Морской доктрине Российской Федерации, утверждённой Указом Президента РФ от 31 июля 2022 г. № 512, и в других действующих нормативных документах, направленных на обновление и развитие российского транспортного флота, повышение его конкурентоспособности на мировом рынке.

Постановка задачи

Несмотря на очевидные преимущества многофазных ЭМ для их внедрения в судовые электроэнергетические системы необходимо преодолеть инерционность производства и технического мышления. Учитывая введённые санкции, направленные, в частности, на ограничения в области развития высоких технологий, включая электроэнергетику, актуальным представляется вопрос дальнейшего развития отечественного производства в целом и электромашиностроения в частности.

Основной задачей статьи является техническое обоснование целесообразности использования мощных многофазных ЭМ в судовых гребных электроустановках.

Теория

Из теории ЭМ известны несколько видов многофазных систем (машин) [8]:

- связанные и несвязанные (рис. 1);

- с четным и с нечетным числом фаз;

- с симметричным расположением m -фазных обмоток и со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками на $t = 120/N$ электрических градусов, где N — число трехфазных обмоток (рис. 2).

Согласно общепринятым определениям, у связанных цепей все три фазы электрически соединены друг с другом, а у несвязанных отдельные фазные обмотки генератора и/или двигателя электрически не соединены между собой.

К преимуществам связанных многофазных систем (рис. 1а) относится наименьшее число проводов, связывающих генераторы и потребители (ЭД),

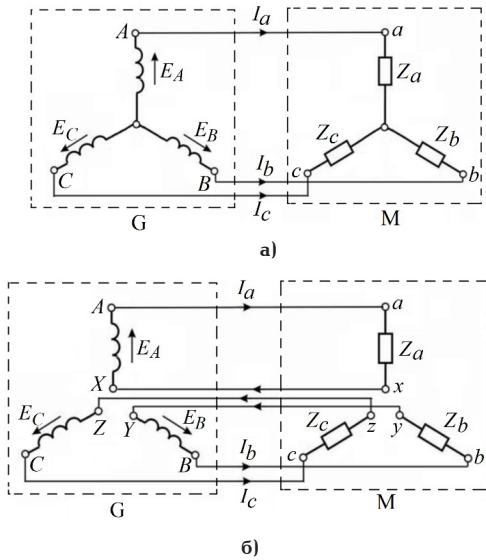


Рис. 1. Связанные (а) и несвязанные (б) трёх-фазные электрические цепи: G — трёхфазный генератор; M — электродвигатель
 Fig. 1. Connected (a) and unconnected (b) three-phase electric circuits:
 G — three-phase generator; M — electric motor

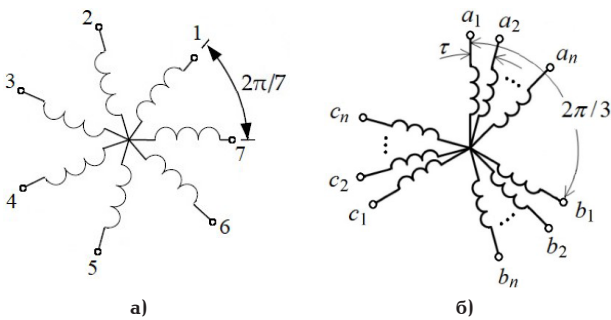


Рис. 2. Многофазные системы: а — симметричные; б — со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками
 Fig. 2. Multiphase systems: a — symmetrical; б — with several three-phase windings offset from each other

а несвязанных (рис. 1б) — независимость от соседних контуров токов I_a , I_b и I_c в каждом отдельно образованном.

В симметричных многофазных системах (рис. 2а) фазы смещены друг относительно друга на угол α , определяемый как

$$\alpha = q \frac{2\pi}{m}, \quad (1)$$

где $q = 1, 2 \dots n$ — кратность фазового смещения; m — число фаз [9].

Для схем ГЭУ с такими симметрично распределёнными многофазными обмотками ЭМ могут быть использованы как обычные двухуровневые выпрямители и инверторы, так и многоуровневые преобразователи (рис. 3). Структура многоуровневых преобразователей и описывающий их математический аппарат известны и достаточно подробно описаны, например, в [8, 9].

Определяющим при выборе числа фаз преобразователей UZ1 и UZ2 является число фаз, соответствующих конструкциям ЭМ, которые, в общем случае, могут быть не равны друг другу.

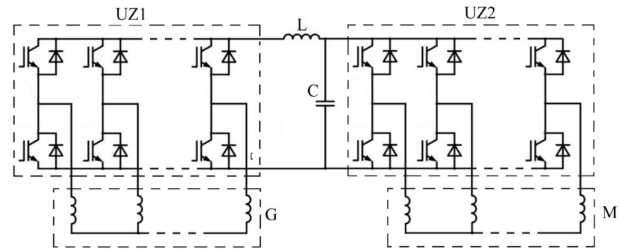


Рис. 3. Силовая схема ГЭУ с двухуровневыми m -фазными преобразователями
 Fig. 3. Power circuit of electric propulsion installations with two-level m -phase converters

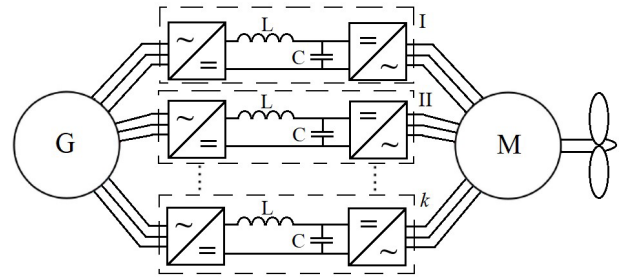


Рис. 4. Силовая схема ГЭУ с ЭМ (G и M), каждая из которых выполнена со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками
 Fig. 4. Power circuit of the electric propulsion installations with electric machines (G and M), each of which is made with several three-phase windings offset from each other

На рис. 3: UZ1 — выпрямитель переменного тока; G — m -фазный генератор; UZ2 — инвертор; M — m -фазный ГЭД.

Для ЭМ со смещенными друг относительно друга несколькими трехфазными обмотками (рис. 2б) целесообразно использование полупроводниковых преобразователей I, II...k (рис. 4) двухзвенного и других типов, которые, в общем случае, также могут быть многоуровневыми или выполненными на основе каскадной топологии [9].

К преимуществам таких машин, наряду с повышенной надёжностью, относится возможность использования для них типовых серийно выпускаемых трехфазных преобразователей. Энергетические характеристики таких ЭМ соизмеримы с аналогичными характеристиками обычных трёхфазных машин. Следует отметить, что известны машины и с большим числом фаз симметричных обмоток, смещённых друг относительно друга. Например, в [10] приведено описание 15-фазной ЭМ с тремя пятифазными симметричными обмотками, каждая из которых питается от отдельного пятифазного преобразователя.

Энергетические показатели таких машин выше аналогичных показателей трёхфазных машин.

Для судовых ГЭУ возможен также вариант силовой схемы, выполненной на основе несвязанных многофазных ЭМ, в которой каждая фаза генератора G соединена с соответствующей фазой ГЭД M через отдельный полупроводниковый преобразователь I, II...k [11] (рис. 5).

Представленные на рис. 3, 4 и 5 силовые схемы ГЭУ характеризуются большей отказоустойчивостью по сравнению со схемами, выполненными на основе трёхфазных машин.

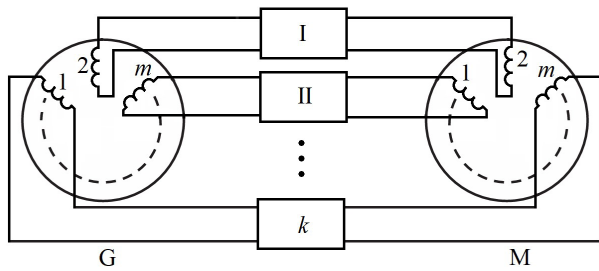


Рис. 5. Силовая схема ГЭУ на основе несвязанных многофазных электрических машин
 Fig. 5. Power circuit of the electric propulsion installations based on uncoupled multiphase electric machines

При выборе главных ЭМ и полупроводниковых преобразователей для ГЭУ необходимо учитывать концепцию единого электроснабжения судна. Кроме того, по мере увеличения числа фаз m в симметричных системах (рис. 2а) изменяется не только междуфазовый угол α (табл. 1), но и соотношение между линейными и фазными напряжениями, что необходимо учитывать при разработке мер по безопасности и обслуживанию судовых сетей.

Значения линейных напряжений U_λ могут быть найдены, например, по теореме косинусов:

$$U_\lambda = \sqrt{U_\phi^2 + U_\phi^2 - 2U_\phi U_\phi \cos \alpha}, \quad (2)$$

где U_ϕ — фазное напряжение.

При $U_\phi = 1$ выражение (2) имеет следующий вид:

$$U_\lambda = \sqrt{1 + 1 - 2 \cos \alpha}. \quad (3)$$

Зависимость соотношения U_λ / U_ϕ от числа фаз m в симметричных системах представлена на рис. 6.

Многофазные ЭМ в генераторном режиме, так же как и обычные трехфазные машины, позволяют получить два уровня напряжений, но отличающихся друг от друга более чем в $\sqrt{3}$ раз. Причем можно подобрать такие m , при которых эти напряжения будут близки к стандартным значениям.

Например, полагая $U_\lambda = 400$ В, при $m = 19$ получим:

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{m} = \frac{400}{0,329} \approx 1200 \text{ В},$$

$$\text{а при } m = 15: \quad U_\phi = \frac{U_\lambda}{m} = \frac{400}{0,416} \approx 962 \text{ В}.$$

Из рис. 6 видно, что при $m > 5$ линейное напряжение меньше фазного. При этом низкий уровень напряжения получают при соединении фазных обмоток генератора в схему «звезда», а высокий уровень — при их соединении в «многоугольник». Следовательно, многоугольные схемы соединения

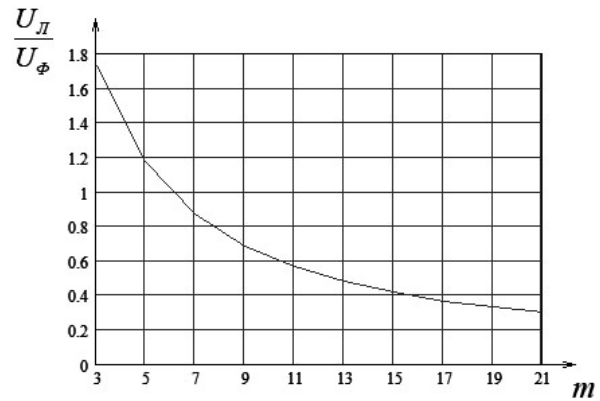


Рис. 6. Зависимость соотношения U_λ / U_ϕ от числа фаз в симметричных системах
 Fig. 6. Dependence of the ratio U_λ / U_ϕ on the number of phases in symmetrical systems

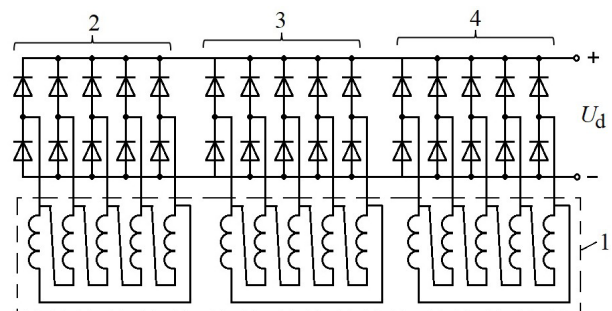


Рис. 7. Вариант схемы соединений 15-фазного генератора (1) с диодными мостовыми выпрямителями (2, 3 и 4)
 Fig. 7. Option of the connection circuit of a 15-phase generator (1) with diode bridge rectifiers (2, 3 and 4)

характеризуются меньшими омическими потерями в обмотках статора, чем звездообразные, а также имеют более высокий $\cos \phi$ (коэффициент мощности), что также отмечено в [2].

Кроме того, при работе машины в генераторном режиме на выпрямители переменного тока могут быть получены различные уровни постоянных напряжений путем изменения конфигурации её обмоток. Например, обмотки 15-фазной машины могут быть соединены следующим образом: в первом случае как три пятифазных генератора со сдвигом каждых соседних фаз каждого одного из них $2\pi/5$, и сдвигом каждых соседних фаз соседних генераторов $2\pi/15$ (рис. 7). А во втором случае как пять трёхфазных генераторов со сдвигом каждых соседних фаз каждого одного из них $2\pi/3$, и сдвигом каждых соседних фаз соседних генераторов также $2\pi/15$.

В изображенной на рис. 7 схеме одинаковые выпрямители 2, 3 и 4 соединены между собой параллельно, что позволяет получить больший в 3 раза ток

Таблица 1. Соотношения между числом фаз m и междуфазовым углом α в симметричных системах
 Table 1. Relations between the number of phases m and the interphase angle α in symmetrical systems

m	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$\alpha, ^\circ$	120,00	72,00	51,43	40,00	32,73	27,69	24,00	21,18	18,95	17,14

нагрузки. При последовательном соединении этих выпрямителей выходное напряжение будет равно сумме каждого из них $U_d = U_{d1} + U_{d2} + U_{d3}$, что дает возможность подключения к ним высоковольтного инвертора, нагруженного на ГЭД и питающегося от относительно низковольтного генератора. А последний может одновременно использоваться для других (низковольтных) электропотребителей.

Еще больше уровней напряжений в самом генераторе можно получить за счет использования машин с несколькими вставленными друг в друга статорно-роторными парами [12], но не с трехфазными обмотками на сердечниках статора, а с многофазными. Кроме того, такой генератор характеризуется большей удельной мощностью по сравнению с обычным генератором, имеющим один статор и один ротор, за счет полезного использования внутреннего его пространства, а также большей надежностью благодаря наличию нескольких статорных обмоток, каждая из которых размещена на отдельном сердечнике.

Требуемое напряжение получают за счет того, что, во-первых, каждая такая обмотка может быть соединена в m -лучевую «звезду» или в m -угольник. А во-вторых, подключенные к этим обмоткам выпрямители могут быть соединены последовательно или параллельно.

Заключение

Таким образом, применение многофазных ЭМ в судовых гребных электроустановках позволит получить ряд преимуществ энергетического и экономического характера: увеличить КПД генераторов и двигателей, выполненных на их основе, повысить качество судовой электроэнергетики и, соответственно, уменьшить коэффициент гармонических искажений (ТНД) благодаря тому, что многофазные полупроводниковые преобразователи генерируют существенно меньшие по амплитуде гармоники и, соответственно, меньше искажают форму питающего их напряжения, а также вызывают меньшие дополнительные потери в электрической сети. При этом массогабаритные показатели фильтров высших гармоник или фальткомпенсирующих устройств могут быть значительно уменьшены. Соответственно образом снизятся и их стоимость.

Кроме того, снижение амплитуды высших гармоник приводит к соответствующему снижению их влияния на токи утечки и на скорость износа изоляции кабельных линий, ЭМ и другого электрооборудования, благодаря чему обеспечивается больший срок их службы. Благодаря тому, что расстояния между источниками электроэнергии и мощными электродвигателями относительно малы, то невелики будут и затраты на приобретение кабельных линий с требуемым числом фаз.

Дополнительным преимуществом многофазных ЭМ является возможность их выполнения одновременно на несколько уровней напряжения, благодаря чему из силовой схемы могут быть исключены дорогостоящие трансформаторы.

Предложены новые ЭМ с несколькими вставленными друг в друга статорно-роторными парами и с многофазными обмотками на сердечниках их статоров.

Наиболее целесообразно применение таких машин на электроходах, т.к. последние имеют наибольшую электровооруженность и вышеперечисленные преимущества проявляются наиболее ярко.

Список источников / References

1. Gholamian M., Beik O., Arshad M. A review of State-of-the-art multiphase and hybrid electric machines. *Electronics*. 2024. Vol. 13 (18). DOI: 10.3390/electronics13183636.
2. Jordan S. Multiphase Synchronous Generators for DC Aircraft Power Systems. School of electrical and electronic engineering: thesis. The University of Manchester, 2013. 233 p.
3. Zhang X. Multiphase Synchronous Generators rectifier system for more-electric transport applications: thesis. The University of Manchester. 2019. 271 p.
4. Mohammad M., Fletcher J., Hassanain N. Novel five-phase permanent magnet generator systems for wind turbine applications. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2010. Vol. 1 (8). P. 778–782. DOI:10.24084/repqj08.473.
5. Логачева А. Г., Вафин Ш. И. Магнитные потери в многофазных электродвигателях, их учет и оценка // Тинчуринские чтения: материалы докл. VI Междунар. молодеж. науч. конф. В 4 т. Казань: Изд-во КГЭУ, 2011. Т. 1. С. 118–119.
6. Logacheva A. G., Vafin Sh. I. Magnitnyye poteri v mnogofaznykh elektrodvigatelyakh, ikh uchet i otsenka [Magnetic losses in multiphase electric engines, their calculation and evaluation]. *Tinchurin Readings*. In 4 vols. Kazan', 2011. Vol. 1. P. 118–119. (In Russ.).
7. Григорьев А. В. Обобщенная модель многофазной электрической машины переменного тока // Введение в энергетику: сб. материалов II Всерос. (с междунар. участием) молодеж. науч.-практ. конф. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2016. 9 с. EDN: YGEFUF.
8. Grigor'yev A. V. Obobshchennaya model' mnogofaznoy elektricheskoy mashiny peremennogo toka [Generalized model of a multiphase alternating current electric machine]. *Vvedeniye v energetiku. Introduction to Energy*. Kemerovo, 2016. 9 p. EDN: YGEFUF. (In Russ.).
9. Бурков А. Ф. Судовые электроприводы. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 372 с. ISBN 978-5-507-49889-5.
10. Burkov A. F. Sudovyye elektroprivody [Marine electric drives]. 5th ed., reprinted. Saint Petersburg, 2024. 372 p. ISBN 978-5-507-49889-5. (In Russ.).
11. Усольцев А. А., Томасов В. С. Многофазные электрические цепи и вращающиеся поля. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. 172 с.
12. Usoltsev A. A. Mnogofaznyye elektricheskiye tsepi i vrashchayushchiyesya polya [Multiphase electric circuits and rotating elds]. Saint Petersburg, 2015. 172 p. (In Russ.).
13. Вертегел Д. А. Многоуровневые и многофазные преобразователи напряжения прецизионных систем электропривода: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2024. 145 с.
14. Vertegel D. A. Mnogourovnevyye i mnogofaznyye preobrazovateli napryazheniya pretzionnykh sistem elektroprivoda [Multilevel and multiphase voltage converters of precision electric drive systems]. Saint Petersburg, 2024. 145 p. (In Russ.).
15. Figueroa J., Cros J., Viarouge P. Generalized Transformations for Polyphase Phase-Modulated Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21 (2). P. 332–341. DOI: 10.1109/TEC.2005.859965.
16. Fioriti M., Vaschetto S., Corpino S., Premoli G. Design of hybrid electric heavy fuel MALE ISR UAV enabling technologies for military operations. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2020. Vol. 92 (5). P. 745–755. DOI: 10.1108/AEAT-05-2019-0109.
17. Пат. 2716489 Российская Федерация, МПК Н 02 К 16/00, Н 02 К 21/12. Электромеханический преобразователь / Михановин В. В. № 2018117769; заявл. 14.05.2018; опубл. 14.11.2019, Бюл. № 32.
18. Patent 2716489 Russian Federation, IPC Н 02 К 16/00, Н 02 К 21/12. Elektromekhanicheskiy preobrazovatel [Electrome-

МИХАНОШИН Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматике судов Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.

SPIN-код: 3354-9524

AuthorID (РИНЦ): 564385

ORCID: 0000-0001-6741-0061

AuthorID (SCOPUS): 57216621545

Адрес для переписки: tetrodaksin@mail.ru

БУРКОВ Алексей Федорович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

SPIN-код: 1892-8849

AuthorID (РИНЦ): 573588

ORCID: 0000-0002-3927-563X

AuthorID (SCOPUS): 56800300900

Адрес для переписки: burkov.22@mail.ru

ФИЛОЖЕНКО Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрооборудования и автоматике судов Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.

SPIN-код: 7309-8930

AuthorID (РИНЦ): 1073342

ORCID: 0000-0003-1684-3849

AuthorID (SCOPUS): 57192304080

Адрес для переписки: filozhenko_a@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 13.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.

MIKHANOSHIN Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Equipment and Automation of Ships Department, Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok.

SPIN-code: 3354-9524

AuthorID (RSCI): 564385

ORCID: 0000-0001-6741-0061

AuthorID (SCOPUS): 57216621545

Correspondence address: tetrodaksin@mail.ru

BURKOV Aleksey Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the School of Engineering, Far Eastern Federal University, Vladivostok.

SPIN-code: 1892-8849

AuthorID (RSCI): 573588

ORCID: 0000-0002-3927-563X

AuthorID (SCOPUS): 56800300900

Correspondence address: burkov.22@mail.ru

FILOZHENKO Aleksey Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Equipment and Automation of Ships Department, Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok.

SPIN-code: 7309-8930

AuthorID (RSCI): 1073342

ORCID: 0000-0003-1684-3849

AuthorID (SCOPUS): 57192304080

Correspondence address: filozhenko_a@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 17.04.2025; approved after reviewing 13.05.2025; accepted for publication 25.06.2025.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПЕЧАТНЫХ КРИОРЕЗИСТИВНЫХ ОБМОТОК ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

О. А. Юшкова, И. Р. Гарипов, И. Ф. Саяхов

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа

В статье представлен обзор литературы по криогенным электрическим машинам. Рассмотрены преимущества и недостатки их разработки и внедрения, проблемы, связанные с использованием высокотемпературных сверхпроводников. Рассмотрены различные подходы к криогенному охлаждению электрических машин, такие как непосредственный контакт хладагента с активными частями электрических машин и охлаждение через контакт активных частей с холодильной машиной. Представлено описание экспериментального стенда для оценки перспектив применения аддитивных технологий в проектировании и производстве обмоток для криогенных электрических машин и методика проведения испытаний печатной обмотки из алюминиевого сплава РС-300 (AlSi10Mg), изготовленной методом SLM-печати. Представлены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых установлена зависимость между температурой обмотки, плотностью тока и мощностью тепловыделения. Сравниваются характеристики печатной алюминиевой обмотки с обмоткой из медного провода, изготовленной традиционным образом.

Ключевые слова: система охлаждения, криогенное охлаждение, печатная обмотка, аддитивные технологии, SLM печать, криогенная электрическая машина, AlSi10Mg.

Для цитирования: Юшкова О. А., Гарипов И. Р., Саяхов И. Ф. Перспективы применения 3D-печатных криорезистивных обмоток для электрических машин // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-66-72. EDN: QNWIPM.



© Юшкова О. А., Гарипов И. Р., Саяхов И. Ф., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROSPECTS FOR APPLICATION OF 3D-PRINTING CRYORESISTANT WINDINGS FOR ELECTRIC MACHINES

O. A. Yushkova, I. R. Garipov, I. F. Sayakhov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

The article presents a review of the literature on cryogenic electric machines. The advantages and disadvantages of their development and implementation, problems associated with the use of high-temperature superconductors are considered. Various approaches to cryogenic cooling of electric machines are considered, such as direct contact of the coolant with the active elements of the electric machine and cooling through the contact of the active elements of the electric machine with the refrigeration machine. A description of an experimental stand for assessing the prospects for the use of additive technologies in the design and production of windings for cryogenic electric machines and a test methodology for a printed winding made of aluminum alloy RS-300 (AlSi10Mg), manufactured by SLM printing are presented. The results of experimental studies are presented, during which the relationship between the winding temperature, current density and heat dissipation power is established. The characteristics of the printed aluminum winding are compared with a winding made of copper wire manufactured in a traditional way.

Keywords: cooling system, cryogenic cooling, printed winding, additive technologies, SLM printing, cryogenic electric machine, AlSi10Mg.

For citation: Yushkova O. A., Garipov I. R., Sayakhov I. F. Prospects for application of 3D-printing cryoresistant windings for electric machines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-66-72. EDN: QNWIPM.



Введение

Современные требования к электрическим машинам (ЭМ), используемым в авиационной, космической и транспортной технике, включают повышение энергетической эффективности и снижение удельной массы. Одним из перспективных направлений повышения их энергетической эффективности является применение криогенного охлаждения, при котором снижение температуры их активных частей, особенно обмоток, приводит к уменьшению электрического сопротивления и, как следствие, снижению потерь на нагрев. Это особенно актуально при использовании альтернативных источников энергии, таких как криогенные виды топлива (водород, метан и др.), хладоресурс которых может быть вовлечён в тепловой баланс установки.

Наряду с этим развитие технологий аддитивного производства, в частности послыонного лазерного сплавления (SLM — Selective Laser Melting), открывает новые возможности в проектировании и изготовлении конструктивных элементов ЭМ. В первую очередь это касается оптимизации внутренних каналов охлаждения, уменьшения массы и повышения интеграции функциональных элементов. Однако широкое внедрение данной технологии в область ЭМ сдерживается недостаточной изученностью физико-технических характеристик материалов, полученных методом SLM, особенно при криогенных температурах.

В данной работе рассматривается возможность применения в обмотке ЭМ алюминиевого сплава PC-300 (AlSi10Mg), изготовленного методом SLM. Основное внимание уделено экспериментальному исследованию его электрических свойств в широком диапазоне температур. Работа направлена на исследование пригодности данного материала для использования в составе обмоток криогенно охлаждаемых ЭМ, с учётом специфики структуры и свойств, формируемых в процессе аддитивного производства.

Обзор применения криогенного охлаждения в электрических машинах

ЭМ с криогенным охлаждением обладают более высокой эффективностью, меньшей массой и меньшими размерами по сравнению с обычными машинами за счет использования способности проводников проводить большой ток с небольшим сопротивлением при охлаждении ниже определенной критической температуры [1–4].

Исторически основное внимание в разработке криогенных ЭМ уделялось сверхпроводниковым материалам. Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) исследовались с 1960-х годов, однако их применение оказалось ограниченным вследствие громоздкости и высокой стоимости охлаждающих систем. Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в конце 1980-х годов упростило требования к охлаждению, но технологические барьеры и высокая стоимость сохраняются [5].

В настоящее время продолжают исследоваться в области применения резистивных (несверхпроводящих) обмоток, охлаждаемых до криогенных температур. Например, алюминий, несмотря на его более высокое удельное сопротивление по сравнению с медью при комнатной температуре, при охлаждении до 77 К демонстрирует снижение сопротивления в 8–10 раз [6], что делает его более приемлемым проводником для применения в условиях криогенного охлаждения. Более того, в этих

условиях возрастающее сопротивление алюминия по сравнению с медью способствует снижению потерь на вихревые токи в высокочастотных режимах, характерных для авиационных и транспортных ЭМ.

Тем не менее повсеместному внедрению криогенного охлаждения препятствует высокая стоимость, энергоёмкость охлаждающих систем и необходимость теплоизоляции активных компонентов. Для отвода всего 1 Вт тепла при температуре 77 К требуется 12–20 Вт мощности охлаждающей установки, а при 20 К — уже 100–200 Вт [7–9]. Эти параметры делают экономически нецелесообразным внедрение криогенных систем без дополнительной синергии с другими функциональными контурами.

Таким образом, актуальной становится концепция интеграции систем охлаждения ЭМ с существующими на борту источниками холода, такими как криогенное топливо. Например, в [10] описан подход, при котором тепло, выделяемое ЭМ, используется для регазификации метана перед его подачей в камеру сгорания, что позволяет реализовать компактную и энергетически эффективную архитектуру (рис. 1). Аналогичные схемы обсуждаются и для беспилотных авиационных платформ [11–12].

С точки зрения реализации криогенного охлаждения различают два подхода: с непосредственным контактом хладагента с обмотками (рис. 2а) [13–23] и с передачей тепла через тепловой мост (рис. 2б) [24–25]. Первый способ более эффективен по теплообмену и применяется в высокомоощных (>100 кВт) машинах. Второй упрощает компоновку, устраняя необходимость в циркуляции хладагента внутри ЭМ.

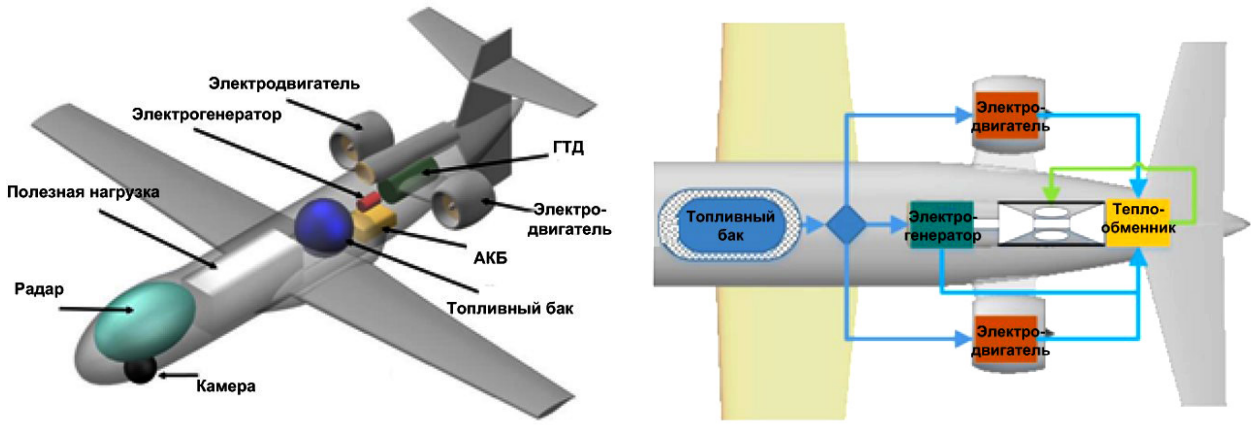
Развитие аддитивных технологий, таких как SLM, предоставляет новые возможности для реализации конструкций криогенно охлаждаемых обмоток. SLM позволяет изготавливать проводящие структуры со сложной геометрией и встроенными каналами охлаждения, обеспечивая снижение массы, повышение тепловой эффективности и оптимизацию токопроводящих путей. При этом алюминиевые сплавы, например PC-300 (AlSi10Mg), хорошо поддаются SLM-обработке, имеют малую плотность и достаточную прочность, что делает их перспективными для авиационных приложений.

Настоящее исследование направлено на оценку электрических свойств алюминиевого сплава PC-300 (AlSi10Mg), полученного методом SLM, в диапазоне температур от комнатной до криогенной, с целью определения перспективности применения таких обмоток в составе криогенно охлаждаемых ЭМ с учётом энергетической эффективности, массогабаритных характеристик и технологичности конструкции. Особое внимание уделяется возможности интеграции охлаждающих каналов и снижению потерь на вихревые токи за счёт оптимального соотношения удельного сопротивления и геометрии проводников.

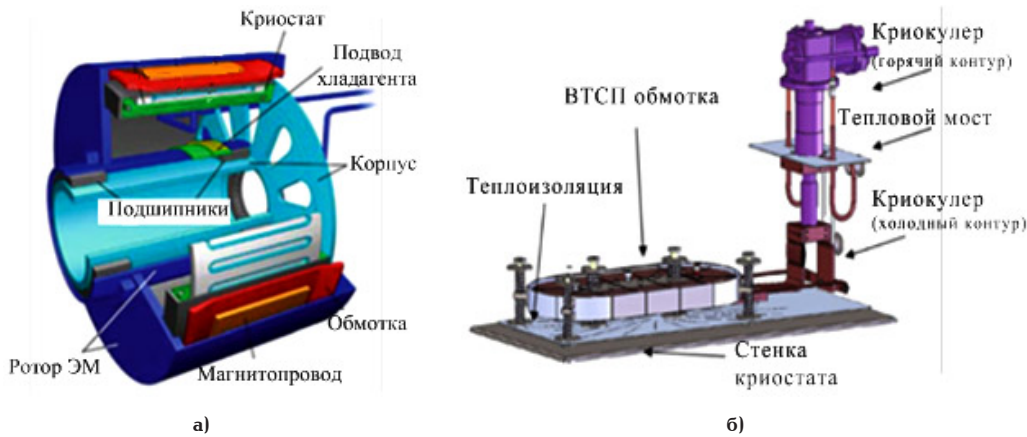
Описание эксперимента

Для исследования перспектив применения аддитивных технологий в проектировании и производстве обмоток ЭМ, работающих в условиях криогенного охлаждения, экспериментальным путем устанавливается зависимость между температурой обмотки T , плотностью тока J и мощностью теплоудаления обмотки Q .

Для проведения экспериментальных исследований и проверки основных характеристик печат-



а)
 б)
 Рис. 1. Облик летательного аппарата с криогенным охлаждением ЭМ:
 а — концептуальный облик летательного аппарата;
 б — функциональная схема силовой установки
 Fig. 1. Appearance of the aircraft with cryogenic cooling
 of the electric machine: a — conceptual appearance of the aircraft;
 б — functional diagram of the power plant



а)
 б)
 Рис. 2. Схемы криогенного охлаждения ЭМ:
 а — с непосредственным контактом хладагента; б — через тепловой мост
 Fig. 2. Schemes of cryogenic cooling of an electric machine:
 а — with direct contact of the coolant; б — through a thermal bridge

ной обмотки был разработан стенд (рис. 3), содержащий:

- экспериментальный макет для исследования обмотки (далее — макет обмотки);
- емкость для погружения обмотки с изоляцией;
- программируемый источник питания постоянного тока;
- весы электронные Scarlett IS-565;
- мультиметр цифровой APPA 207.

Для упрощения конструкции стенда на первом этапе испытаний печатных обмоток изменение расхода хладагента не происходит. Охлаждение обмоток осуществляют путем погружения в емкость с жидким азотом. Емкость для погружения обмотки не пополняется хладагентом. Стенд обеспечивает постоянную температуру окружающей среды ($T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$) при различных уровнях нагрузки ($J = 10 - 70\text{ А/мм}^2$). Тепло от обмоток отводится посредством фазового перехода хладагента. Принятое упрощение снижает интенсивность охлаждения, однако не влияет на адекватность результатов эксперимента в связи с малыми размерами макетного образца. Снижение интенсивности охлаждения мо-

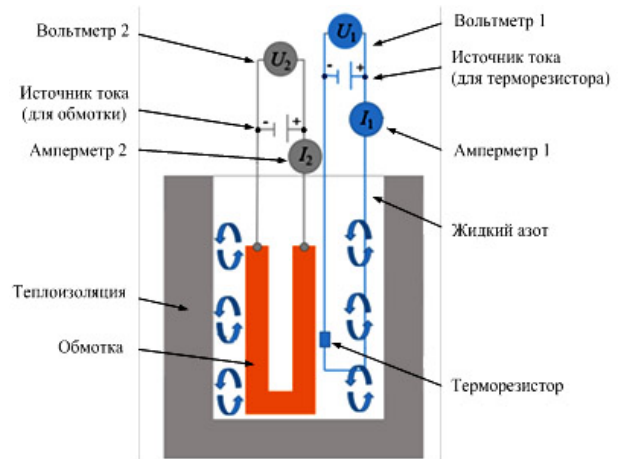


Рис. 3. Схема стенда системы испытания криорезистивных обмоток
 Fig. 3. Scheme of the test stand for cryoresistive windings

жет компенсироваться большим объемом используемого хладагента.



а) б)
Рис. 4. Макет обмотки, изготовленной с помощью SLM:
 а — макет печатной обмотки; б — макет из провода ПНЭТ-имид
Fig. 4. Winding layout manufactured using SLM:
 а — printed winding layout; б — layout made of PNET-imid wire

Термометр сопротивления размещают в макете обмотки в местах с максимальным превышением температуры в соответствии с предварительно проведенным тепло-гидравлическим расчетом. Термометр сопротивления работает следующим образом: от программируемого источника питания АКПП-1128 (A_1 на рис. 3) ток I_1 поступает на медную проволоку, в зависимости от температуры $T_{окр}$ изменяется сопротивление R_1 и напряжение U_1 проволоки. Напряжение и сопротивление связаны через закон Ома для участка цепи ($R_1 = U_1/I_1$). Напряжение измеряется на мультиметре АРРА-207 (U_1 на рис. 3). Температура пересчитывается по сопротивлению, температурный коэффициент составляет $k = 0,003905$ 1/К. Первый датчик температуры располагают в зоне пайки обмотки к выводным проводам, второй — в области лобовой части обмотки. Крепление терморезисторов осуществляется полиамидным скотчем.

Контроль температуры обмотки осуществляют через замеры напряжения в обмотке U_2 на мультиметре АРРА 207 с последующим пересчетом температуры по температурному коэффициенту для меди. За начальную точку для определения зависимости сопротивления от температуры принимают: $T_{о6} = 24,1$ °С, $I_2 = 40$ А; $R_2 = 0,1325$ мОм. Данным условиям соответствует напряжение $U_2 = 0,1325$ В. Определение массы испарившегося хладагента осуществляется по показаниям весов Scarlett IS-565 m.

Экспериментальный макет для исследования обмотки сконструирован так, чтобы достоверно повторять одну секцию обмотки статора ЭМ. Конструкция макета печатной обмотки представлена на рис. 4а. Макет обмотки представляет собой катушку из материала РС-300 (AlSi10Mg), изготовленную методом SLM-печати на 3D-принтере производства АО «Лазерные системы». Дополнительно изготовлен образец из провода ПНЭТ-имид для сопоставления (рис. 4б).

Выводы обмоток, изготовленные из провода сечением 50 мм², подключают к источнику питания. Крепление выводов к образцу печатной обмотки осуществляют пайкой. Макет обмотки оснащен двумя терморезистивными датчиками Pt-100. Катушка содержит 1 виток алюминия РС-300 (AlSi10Mg) сечением $S = 3,925$ мм², что эквивалентно 80 виткам из провода ПНЭТ-имид диаметром $D = 0,5$ мм.

Набор устройств контроля включает в себя: программируемый источник питания постоянного тока; программируемый источник питания; два цифровых мультиметра АРРА 207; электронные весы Scarlett IS-565. Данный набор устройств контроля и измерения позволяет фиксировать параметры

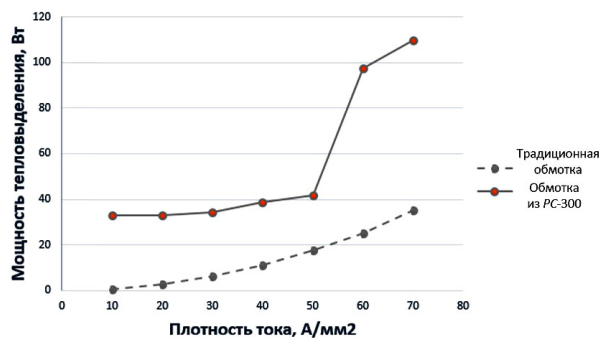


Рис. 5. Сравнение результатов расчета
Fig. 5. Comparison of calculation results

электрической цепи: силу тока I и напряжения, изменения массы хладагента, а также температуры на поверхностях обмотки.

На стенде проводится серия экспериментов, включающих в себя испытания обмоток при плотности тока $J = 10-70$ А/мм² с шагом $\Delta J = 10$ А/мм². В пересчёте на силу тока ($I = J \cdot S$) от источника получим следующие значения: 40 А, 80 А, 120 А, 160 А, 200 А.

При подготовке к работе и проведении испытаний выполняются следующие операции:

— заполненную хладагентом емкость помещают на электронные весы;

— обмотку погружают в емкость с хладагентом, после чего на термометр сопротивления подают ток I_1 , далее визуальным контролем значения напряжения U_1 на вольтметре 1 определяют установившийся режим работы;

— после установления температуры на обмотку подают ток I_2 , после чего измеряют напряжение U_2 на обмотке и массу испарившегося хладагента m .

Перед началом испытаний производят контроль параметров. Во время эксперимента температура окружающего воздуха составляла $T_{окр} = 24,4$ °С, температура азота $T_{азот} = -196$ °С (при $I_1 = 1,5$ А; $U_1 = 0,0039$ В); сопротивление обмотки $R_2 = 0,1325$ мОм (при $T_{о6} = 24,4$; $I_2 = 40$ А; $U_2 = 0,1325$ В), масса азота в емкости $m_a = 0,354$ кг. Теплота испарения азота принималась $r = 199,92$ кДж/кг.

Результаты эксперимента

Эксперимент проводился в течение 35 минут. После 5 минут испытаний подачу тока прекращали, а емкость заполняли хладагентом до начального уровня. За счет кипения жидкого азота обеспечивалась постоянство температуры окружающей среды.

С интервалом в 1 минуту производились замеры массы выкипевшего хладагента и напряжения. Результаты исследования представлены на рис. 5.

Холодопроизводительность системы рассчитывалась через значение доли выкипевшего азота:

$$Q = \dot{m} \cdot r,$$

где Q — холодопроизводительность, т.е. количество тепла, которое система отводит в единицу времени (Вт, кВт); \dot{m} — массовый расход, т.е. количество хладагента, которое испаряется в единицу времени (кг/с); r — удельная теплота парообразования (испарения), т.е. количество тепла, необходимое для испарения одного килограмма жидкости при постоянной температуре и давлении (Дж/кг). Удельная теплота испарения азота принималась $r = 199,92$ кДж/кг.

Экспериментальные исследования показали, что при одинаковой плотности тока печатная алюминиевая обмотка, изготовленная методом порошковой металлургии, демонстрирует повышение температуры на 10°C по сравнению с традиционной обмоткой из медного провода. Это обусловлено более высоким удельным электрическим сопротивлением материала, сформированного аддитивным методом, что связано с его микроструктурой и возможной пористостью. В ходе испытаний был зафиксирован значительный локальный перегрев в зоне крепления выводных проводов, что свидетельствует о термических дефектах соединений, влияющих на распределение тепловых полей и требующих дополнительного внимания при проектировании обмоток.

Холодопроизводительность системы охлаждения оценивалась посредством измерения доли испарившегося жидкого азота, который в процессе фазового перехода поглощает энергию, выделяемую как внутренними тепловыделениями в обмотках, так и внешними теплопритоками. Внешние теплопритоки составляли порядка 20–30 Вт, что необходимо учитывать при проектировании и калибровке экспериментального стенда, чтобы отделить собственно тепловыделения обмоток от внешних источников. Установлена количественная зависимость между плотностью тока и необходимым расходом хладагента: увеличение плотности тока в образце, выполненном аддитивным способом, в 7 раз приводит к возрастанию расхода жидкого азота примерно в 2,5 раза. Представленные данные подчёркивают важность точного теплового баланса при проектировании систем криогенного охлаждения.

Заключение

Применение криогенного охлаждения в электрических машинах позволяет значительно повысить их энергетическую эффективность за счёт снижения электрических и тепловых потерь. Однако реализация подобных систем сопряжена с высокой сложностью и затратностью, требует использования специализированных материалов и оборудования, способных работать при экстремально низких температурах.

В настоящей работе разработан экспериментальный стенд для испытаний обмоток, изготовленных аддитивным методом, в условиях, приближенных к реальным криогенным режимам. Результаты показали, что аддитивные алюминиевые обмотки имеют более высокое удельное сопротивление и, как следствие, более выраженный нагрев по сравнению

с традиционными обмотками. Локальные перегревы в зонах соединений выявляют необходимость улучшения технологий монтажа и соединения выводных проводов. Метод измерения холодопроизводительности по доле испарившегося жидкого азота доказал свою применимость, однако требует тщательного учёта внешних теплопритоков для корректного анализа теплового баланса.

Данные результаты подтверждают потенциал аддитивных технологий для производства обмоток в криогенных электрических машинах, однако указывают на необходимость дальнейших комплексных исследований. В частности, требуется изучение поведения таких обмоток при воздействии переменных и импульсных токов с различными методами модуляции (широотно-импульсной, частотно-импульсной), а также оптимизация конструкции и материала для повышения тепловой устойчивости и снижения потерь.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00177 «Исследование и совершенствование систем охлаждения для повышения удельной мощности электрических машин».

The work has supported by the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 24-29-00177 "Research and improvement of cooling systems to increase the power density of electric machines".

Список источников / References

1. Jansen R. H., Brown G. V., Felder J. L., Duffy K. P. Turboelectric aircraft drive key performance parameters and functional requirements. *Proceedings of AIAA Propulsion & Energy*. Orlando, FL, USA. 2015. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160006295> (accessed: 14.02.2025).
2. Berg F., Palmer J., Miller P., Dodds G. HTS system and component targets for a distributed aircraft propulsion system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017. Vol. 27 (4). P. 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2017.2652319.
3. Ковалев А. К., Ларионов А. Е., Модестов К. А. [и др.]. Перспективы применения криогенных электрических машин в авиации // *Электричество*. 2015. № 1. С. 4–13. EDN: TGTGYR.
4. Kovalev L. K., Larionov A. E., Modestov K. A. [et al.]. Perspektivy primeneniya kriogennykh elektricheskikh mashin v aviatsii [Prospects for using cryogenic electrical machines in aircraft engineering]. *Elektrichestvo*. 2015. No. 1. P. 4–13. EDN: TGTGYR. (In Russ.).
5. Ковалев К. Л., Дежин Д. С., Иванов Н. С. Оценка перспектив увеличения удельной мощности электрических машин для БЭС и ПЭС // *Вестник РГАТУ. имени П. А. Соловьева*. 2015. № 4 (35). С. 9–16. EDN: VJIMVX.
6. Kovalev K. L., Dezhin D. S., Ivanov N. S. Otsenka perspektiv uvelicheniya udel'noy moshchnosti elektricheskikh mashin dlya BES i PES [Possible ways to increase specific power of electrical machines for electric airplanes]. *Vestnik RGATU. imeni P. A. Solovyeva*. 2015. No. 4 (35). P. 9–16. EDN: VJIMVX. (In Russ.).
7. Ковалёв А. К., Ковалёв К. Л., Колчанова И. П., Полтавец В. Н. Зарубежные и российские разработки в области создания сверхпроводниковых электрических машин и устройств // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2012. № 6. С. 3–26. EDN: PJCMTH.
8. Kovalev L. K., Kovalev K. L., Kolchanova I. P., Poltavets V. N. Zarubezhnyye i rossiyskiye razrabotki v oblasti sozdaniya

- sverkhprovodnikovyykh elektricheskikh mashin i ustroystv [Foreign and Russian developments in the sphere of creation of superconducting electrical machines and devices]. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika. Proceedings of the Russian academy of Sciences. Power Engineering*. 2012. No. 6. P. 3–26. EDN: PJCMTH. (In Russ.).
6. Guo Y., Majoros M., Cantemir C. G. [et al.]. Experimental study of two-phase cryogenic cooling of aluminum stator conductors using a single slot test configuration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1301 (1). P. 012161. DOI: 10.1088/1757-899X/1301/1/012161.
7. Biasion M., João Fernandes F. P., Branco P. J. d. C., Vaschetto S. [et al.]. A Comparison of Cryogenic-Cooled and Superconducting Electrical Machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. P. 4045–4052. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595182.
8. Гарипов И. Р., Ахмедзянов Д. А. Системы терморегулирования перспективных дозвуковых летательных аппаратов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2023. Т. 27, № 2 (100). С. 100–118. DOI: 10.54708/19926502_2023_272100100. EDN: AAGXHZ.
- Garipov I. R., Akhmedzyanov D. A. Sistemy termoregulirovaniya perspektivnykh dozvukovykh letatel'nykh apparatov [Thermal management systems for advanced subsonic aircrafts]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik UGATU*. 2023. Vol. 27, no. 2 (100). P. 100–118. DOI: 10.54708/19926502_2023_272100100. EDN: AAGXHZ. (In Russ.).
9. Grilli F., Pardo E., Stenvall A., Nguyen D. N. Computation of losses in HTS under the action of varying magnetic fields and currents. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 24 (1). P. 78–110. DOI: 10.1109/TASC.2013.2259827.
10. Sibilli T., Senne C., Jouan H. [et al.]. Synergistic hybrid-electric liquid natural gas drone: S.H.I.E.L.D. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2020. Vol. 92, no. 5. P. 757–768. DOI: 10.1108/AEAT-10-2019-0211.
11. Çınar H., Kandemir I., Donato T. Current Technologies and Future Trends of Hydrogen Propulsion Systems in Hybrid Small Unmanned Aerial Vehicles. *Hydrogen Electrical Vehicles*. Wiley & Sons Ltd, 2023. P. 75–109. ISBN 978-1-394-16638-1.
12. Гарипов И. Р., Саяхов И. Ф., Юшкова О. А. [и др.]. Обзор систем охлаждения криогенных электрических машин // Materials. Technologies. Design. 2023. Т. 5, № 1 (11). С. 13–26. DOI: 10.54708/26587572_2023_511113. EDN: KEVOXT.
- Garipov I. R., Sayakhov I. F., Yushkova O. A. [et al.]. Obzor sistem okhlazhdeniya kriogennykh elektricheskikh mashin [Overview of cooling systems for cryogenic electric machines]. *Materials. Technologies. Design*. 2023. Vol. 5, no. 1 (11). P. 13–26. DOI: 10.54708/26587572_2023_511113. EDN: KEVOXT. (In Russ.).
13. Montoya R. A., Delgado S., Castilla J. [et al.]. Methods to simplify cooling of liquid helium cryostats. *HardwareX*. 2019. Vol. 5. DOI: 10.1016/j.ohx.2019.e00058.
14. Karagusov V. I., Levin S. L., Svjatij V. V., Goshlja R. Ju. Superfluid helium cryostat for sensitive elements cooling. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152 (4). P. 439–445. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.615.
15. Dyson R. W., Jansen R. H., Duffy K. P., Passe P. J. High efficiency megawatt machine rotating cryocooler conceptual design. *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*. 2019. P. 1–15. DOI: 10.2514/6.2019-4515.
16. Duffy K., Passe P., Dyson R. [et al.]. High Efficiency Megawatt Motor (HEMM) Cryocooler Linear Motor – Analysis and Test. *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. 2020. DOI: 10.2514/6.2020-3601.
17. Xiao J., Zhao Y., Dutta R., Haran K. Rotating Cryocooler Performance for Superconducting Rotor. *2023 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*. 2023. DOI: 10.1109/PECI57361.2023.10197681.
18. Redmond J. H., Bott F. W. Development of cryogenic electric motors. SAE Technical Paper 640023. 1964. DOI: 10.4271/640023.
19. Chao G., Jiabao W., Shoudao H., Yaojing F. Characteristic analysis of the cryogenic permanent magnet synchronous motor for the submerged LNG pump. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056434.
20. Chengliu Ai., Yuanfeng Hu., Haifeng W. Main losses study of cryogenic induction motor for submerged liquid natural gas pump. *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2015. P. 133–136. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385014.
21. Guechi M., Desevaux P., Baucour P. [et al.]. Spray cooling of electric motor coil windings. *Journal of Computational Multiphase Flows*. 2016. Vol. 8 (2). P. 95–100. DOI: 10.1177/1757482X16653895.
22. Ping S., JinCheng F., Wei D. [et al.]. Study on Radial Oil Spray Cooling of end Windings with Hairpin Motors. DOI: 10.2139/ssrn.4718093.
23. Ghahfarokhi P. S., Podgornovs A., Kallaste A. [et al.]. Oil Spray Cooling with Hairpin Windings in High-Performance Electric Vehicle Motors. *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. 2021. 9376390. DOI: 10.1109/IWED52055.2021.9376390.
24. Kim Y., Ki T., Kim H. [et al.]. High temperature superconducting motor cooled by on-board cryocooler. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21 (3). P. 2217–2220. DOI: 10.1109/TASC.2010.2094597.
25. Atrey M. D. Cryocoolers: Theory and Applications. Springer Nature, 2020. 236 p.

ЮШКОВА Оксана Алексеевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник Передовой инженерной школы (ПИШ) «Моторы будущего» Уфимского университета науки и технологий (УУНИТ), г. Уфа.
SPIN-код: 8797-3363
AuthorID (РИНЦ): 725096
ORCID: 0009-0007-2446-4538
AuthorID (SCOPUS): 56708635300
ResearcherID: O-6498-2017
Адрес для переписки: yushkova-usatu@bk.ru
ГАРИПОВ Искандер Радикович, аспирант, инженер ПИШ «Моторы будущего» УУНИТ, г. Уфа.
SPIN-код: 6803-6722
AuthorID (РИНЦ): 1134606
ORCID: 0000-0001-7966-8967
AuthorID (SCOPUS): 57447078200
Адрес для переписки: garipovir@yahoo.com
САЯХОВ Ильдус Финатович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ПИШ «Моторы будущего» УУНИТ, г. Уфа.
SPIN-код: 7833-684
AuthorID (РИНЦ): 918578
ORCID: 0000-0001-8545-9862
AuthorID (SCOPUS): 57195195950
ResearcherID: O-3928-2017
Адрес для переписки: isayakhov92@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 18.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

YUSHKOVA Oksana Alekseyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Motors of the Future Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 8797-3363

AuthorID (RSCI): 725096

ORCID: 0009-0007-2446-4538

AuthorID (SCOPUS): 56708635300

ResearcherID: O-6498-2017

Correspondence address: yushkova-usatu@bk.ru

GARIPOV Iskander Radikovich, Postgraduate, Engineer at the Motors of the Future Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 6803-6722

AuthorID (RSCI): 1134606

ORCID: 0000-0001-7966-8967

AuthorID (SCOPUS): 57447078200

Correspondence address: garipovir@yahoo.com

SAYAKHOV Ildus Finatovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Motors of the Future Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 7833-684

AuthorID (RSCI): 918578

ORCID: 0000-0001-8545-9862

AuthorID (SCOPUS): 57195195950

ResearcherID: O-3928-2017

Correspondence address: isayakhov92@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 18.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

А. М. Дайнович

Омский государственный технический университет, г. Омск

Статья посвящена оценке возможности расширения рабочего диапазона электропривода с фазовой синхронизацией в области низких частот вращения. В работе представлены имитационные модели аналоговой и цифровой систем управления электроприводом, выполненные в программе Matlab. Исследование предложенных моделей выполнено с помощью метода фазовой плоскости. На основании сравнительного анализа результатов моделирования определена нижняя частотная граница использования различных способов демодуляции и методов исследования контура фазовой синхронизации.

Ключевые слова: электропривод с фазовой синхронизацией, устройство демодуляции сигнала, фильтр низких частот, схема выборки-хранения, метод фазовой плоскости, имитационное моделирование, частотный диапазон.

Для цитирования: Дайнович А. М. Сравнительный анализ способов демодуляции сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-73-78. EDN: KFUSBN.



© Дайнович А. М., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SIGNAL DEMODULATION METHODS IN PHASE-LOCK MOTOR DRIVE

A. M. Daynovich

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article is devoted to assessing the possibility of expanding the operating range of phase-lock motor drive in the low shaft speed area. The analog and digital control system models of motor drive in Matlab software are proposed. The research of proposed models is obtained by using phase plain method. Based on a comparative analysis of the simulation results, the lower frequency limit for using different demodulator types and research methods of phase-lock loop is determined.

Keywords: phase-lock motor drive, demodulation device, low-pass filter, sample-and-hold circuit, phase plain method, simulation modeling, frequency bandwidth.

For citation: Daynovich A. M. Comparative analysis of signal demodulation methods in phase-lock motor drive. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-73-78. EDN: KFUSBN.



© Daynovich A. M., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Системы электропривода, применяемые в робототехнике, станках с программным управлением или системах сканирования, могут быть построены на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализованный на основе принципа ФАПЧ, обладает высокой точностью регулирования

и быстродействием [1, 2], обеспечивает простую интеграцию с различными смежными системами за счет применения цифровых устройств со стандартизированными интерфейсами и протоколами обмена в контуре синхронизации. Электропривод на основе принципа ФАПЧ применяется для управления электродвигателями постоянного тока и асинхронными машинами. Одним из перспектив-

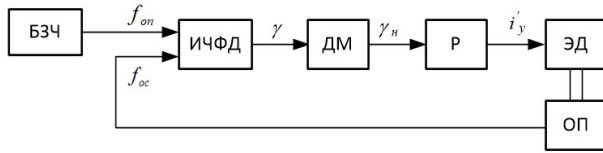


Рис. 1. Блок-схема ЭПФС
 Fig. 1. Block diagram of the Phase-Lock Motor Drive

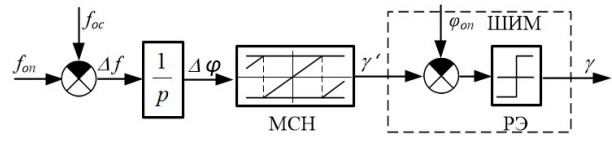


Рис. 2. Полная математическая модель ИЧФД
 Fig. 2. Full mathematical model of Pulse Frequency-Phase Detector

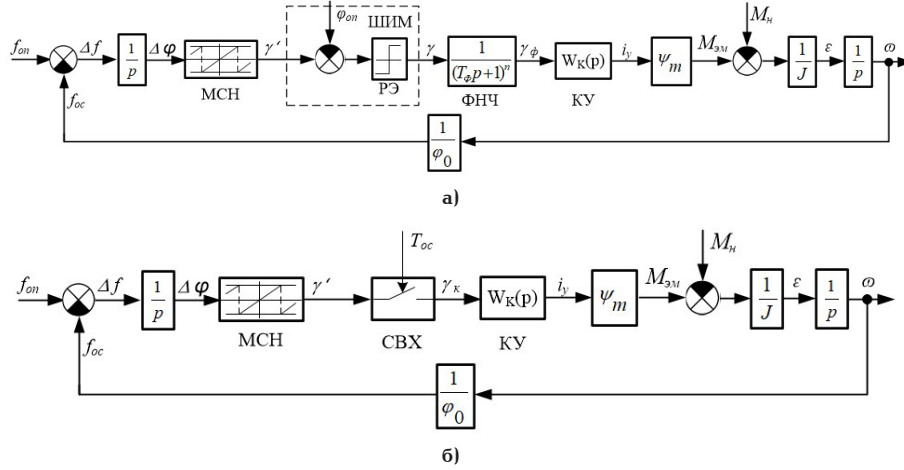


Рис. 3. Структурные схемы систем автоматического управления САУ с различными способами демодуляции сигнала ИЧФД: а — аналоговая система с фильтром нижних частот; б — цифровая система со схемой выборки-хранения
 Fig. 3. Control systems block diagrams with different types of PFPD demodulators: а — analog system with low-pass filter; б — digital system with sample-and-hold circuit

ных направлений развития функциональных возможностей ЭПФС является расширение диапазона регулирования в области низких частот вращения.

В электроприводе с фазовой синхронизацией, реализованном на основе принципа ФАПЧ (рис. 1), сигнал задания частоты вращения f_{on} формируется с помощью блока задания частоты (БЗЧ), а сигнал обратной связи f_{oc} — с помощью оптического преобразователя с высокой разрешающей способностью (ОП). Логическое устройство сравнения импульсных сигналов реализуется на основе частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД). Регулятор (Р) обеспечивает заданные условиями применения показатели управления электродвигателем (ЭД). Демодулятор (ДМ) предназначен для фильтрации выходного сигнала ИЧФД и подавления высокочастотных пульсаций [3]. В рамках данной работы будет рассматриваться система управления бесколлекторным двигателем постоянного тока (БДПТ).

Синхронизация ЭПФС достигается за счет работы ИЧФД в трех режимах — режимы насыщения при разгоне или торможении электропривода, режим фазового сравнения в пропорциональном режиме работы электропривода. В режимах насыщения выходной сигнал ИЧФД γ представляет собой постоянное напряжение высокого или низкого уровня в зависимости от режима работы электропривода [3]. В режиме фазового сравнения он представляет собой последовательность импульсов, формируемую с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с периодом T_{on} , длительность которых пропорциональна величине фазового рассогласования $\Delta\varphi$ входных частотных сигналов.

I. Теория

В связи с особенностями приведенных режимов работы ИЧФД представляет собой элемент с нели-

нейной характеристикой. Для выполнения исследований динамических процессов в электроприводе может быть использована рассмотренная в работе [4] полная математическая модель устройства сравнения (рис. 2).

В ЭПФС в основном применяют два способа демодуляции выходного сигнала ИЧФД: фильтр нижних частот (ФНЧ) в области высоких частот вращения электропривода, схему выборки-хранения (СВХ) в области низких [3, 5]. Соответственно, с учетом полной математической модели ИЧФД анализ динамических процессов в системе автоматического управления может быть осуществлен на основе двух структурных схем: с демодулятором на основе ФНЧ (рис. 3а) и с СВХ (рис. 3б). На представленных структурных схемах: $W_k(p)$ — передаточная функция регулятора, ψ_m — максимальная величина потокосцепления постоянных магнитов с обмотками двигателя, J — суммарный момент инерции ротора с учетом нагрузки на валу. Коэффициент передачи фотоэлектрического преобразователя частоты вращения обратно пропорционален величине углового расстояния между его соседними метками, определяемой соотношением $\varphi_0 = 2\pi/Z$, где Z — общее число меток преобразователя.

Возможности исследования и проектирования в ЭПФС с демодулятором на основе ФНЧ в области низких частот ограничены условиями применения в контуре ФАПЧ устройств такого типа, поэтому в работе [6] была выполнена оценка влияния постоянной времени ФНЧ на динамические характеристики электропривода в пропорциональном режиме работы. Кроме этого, в области низких частот на динамические характеристики оказывает существенное влияние ШИМ-сигнал фазового рассогласования γ , поэтому для исследования ЭПФС

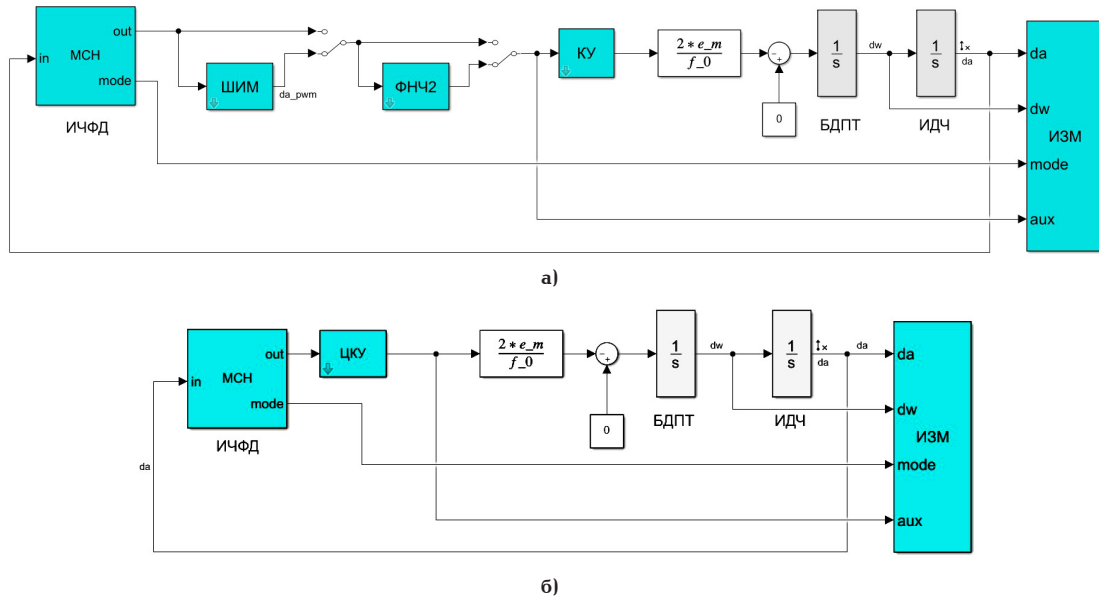


Рис. 4. Имитационные модели ЭПФС в программе Matlab: а — аналоговая система с демодулятором на основе фильтра нижних частот; б — цифровая система с демодулятором на основе схемы выборки-хранения
 Fig. 4. Matlab Simulink models of PLMD:
 а — analog system with low-pass filter; б — digital system with sample-and-hold circuit

применяются методы нелинейных систем автоматического управления (САУ) [7].

Исследование динамических характеристик ЭПФС с демодулятором выходного сигнала ИЧФД на основе схемы выборки-хранения может быть осуществлено с использованием методов цифровых САУ, в этом случае передаточная функция демодулятора будет соответствовать передаточной функции экстраполятора нулевого порядка. Корректирующее устройство может быть реализовано в цифровой форме, а изменяющийся в пропорциональном режиме работы период дискретизации T_{oc} может быть заменен постоянным периодом T_{on} [8].

II. Постановка задачи

Задачей данной работы является сравнительная оценка возможностей применения демодуляторов на основе ФНЧ и СВХ в области низких частот вращения.

Проведем оценку нижней границы частоты вращения электропривода, при которой не происходит искажения переходного процесса при смене режимов работы ИЧФД.

Такая задача может быть решена с применением имитационного моделирования в программном комплексе Matlab. Для выполнения исследования в ходе работы созданы две компьютерные модели: аналоговой системы ЭПФС с демодулятором на основе ФНЧ (рис. 4а) и цифровой системы ЭПФС с демодулятором на основе СВХ (рис. 4б), соответствующие приведенным выше структурным схемам САУ (рис. 3). В процессе разработки имитационных моделей были выполнены преобразования исследуемых структурных схем на основе следующих допущений:

— при работе электропривода в режимах разгона или торможения максимальная величина токоограничения рассматриваемого электродвигателя может быть задана на уровне:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m J}{\Psi_m},$$

где ε_m — максимальное угловое ускорение электродвигателя;

— выходной ИЧФД нормирован величиной углового расстояния между метками фотоэлектрического преобразователя угла значением $\pm\varphi_0/2$ и ограничен значениями $\gamma = \pm 0,5$.

Реализованные компьютерные модели состоят из следующих функциональных блоков:

1. «МСН» — звено с нелинейной характеристикой [4], соответствующей особенностям работы частотно-фазового дискриминатора. Блок выполнен на основе М-функции [9] и дополнительно снабжен выходным сигналом индикации смены режима работы ИЧФД «mode».

2. «ШИМ» — выполняет преобразование выходного сигнала ИЧФД с помощью широтно-импульсной модуляции с частотой f_{on} . Выходной сигнал блока ограничен по уровню значениями, нормированными величиной углового расстояния между метками импульсного датчика.

3. «ФНЧ2» — фильтр нижних частот 2-го порядка, выполненный на основе аperiodического звена с единичным коэффициентом усиления и возможностью настройки постоянной времени T_ϕ .

4. «КУ» — аналоговое корректирующее устройство (ПД-регулятор) с передаточной функцией $W(p) = K(Tp + 1)$.

5. «ЦКУ» — цифровое корректирующее устройство, содержащее дискретную передаточную функцию, экстраполятор нулевого порядка и элемент формирования начальных условий выходного сигнала регулятора.

6. Модели бесколлекторного электродвигателя постоянного тока и оптического преобразователя на основе элементов «Integrator».

7. «ИЗМ» — функциональные блоки для анализа переходных процессов методом фазовой плоскости.

Для выполнения анализа переходных процессов в контуре ЭПФС разработанная модель (рис. 4а) снабжена управляемыми ключами, позволяющими включать или исключать блоки ШИМ и ФНЧ из схемы в процессе моделирования. Такой подход позволил получить на начальном этапе иссле-

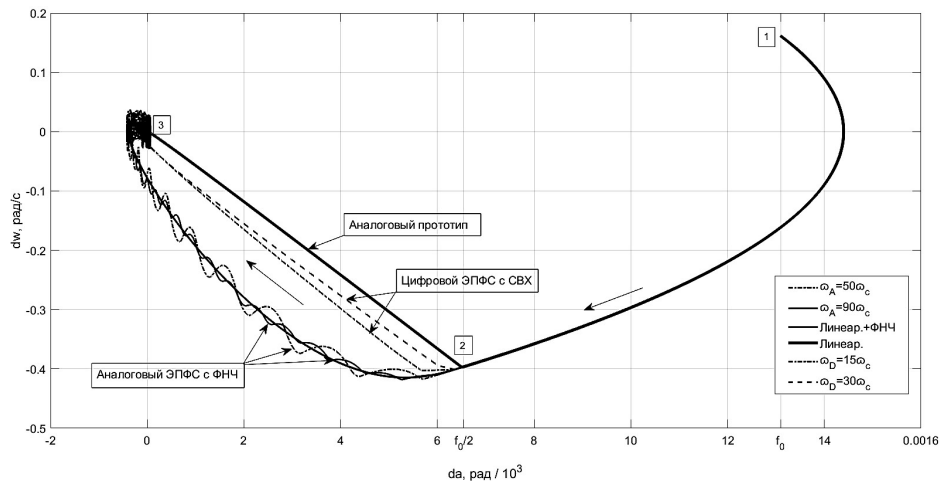


Рис. 5. Фазовые портреты исследуемых моделей ЭПФС
 Fig. 5. Phase-plane portraits of proposed PLMD models

дования фазовые портреты аналогового прототипа — линеаризованной системы без учета влияния ШИМ-сигнала, относительно которых в ходе работы в дальнейшем выполнялся сравнительный анализ.

Дискретная передаточная функция цифрового регулятора в составе блока ЦКУ (рис. 4б) получена путем аппроксимации линейной передаточной функции аналогового ПД-регулятора с помощью метода Эйлера [10, 11]. Примем дискретную передаточную функцию в виде:

$$W_{ЦР}(Z) = \frac{\frac{k(T_k + T_0)}{T_0} Z - \frac{kT_k}{T_0}}{Z} = \frac{q_1 Z - q_2}{Z},$$

где T_k — постоянная времени аналогового регулятора, настроенного на критический переходный процесс; K — коэффициент усиления ПД-регулятора; T_0 — период дискретизации в цифровой системе автоматического управления (ЦСАУ).

При реализации цифрового корректирующего устройства в модели была учтена необходимость задания начального значения выходного сигнала регулятора. Она обусловлена особенностями работы дискретных систем управления, когда величина коррекции может быть определена только после первого интервала квантования. Данная особенность может значительно повлиять на величину перерегулирования в системе, а в случаях значительного фазорассогласования привести к ошибочному переключению режима работы ИЧФД, поэтому значение выходного сигнала ЦКУ в начальный момент времени было установлено на основе соотношения:

$$i_y(0) = k\varphi_0/2.$$

Моделирование было проведено с различной частотой ШИМ и частотой квантования в схеме выборки-хранения. Учитывая, что выбор величины постоянной времени ФНЧ зависит от частоты среза замкнутой линеаризованной системы регулирования ω_{cp} ЭПФС [6], задание частоты дискретизации выполнялось на основе соотношения:

$$\omega = N\omega_{cp} = N \frac{2}{T_k},$$

где T_k — постоянная времени критического переходного процесса, $N = 1,2..100$ — множитель частоты. Верхняя граница множителя частоты выбрана на декаду большей частоты среза ФНЧ [6], что обеспечит качественную фильтрацию ШИМ-сигнала и форму фазового портрета, соответствующую линеаризованному аналоговому прототипу. Отметим, что выбранный диапазон частоты дискретизации в схеме выборки-хранения соответствует критериям точности воспроизведения динамических характеристик аналогового прототипа, определенный в [12].

III. Результаты моделирования

В процессе моделирования использовались следующие данные для расчетов: число меток оптического преобразователя частоты $Z = 4800$, максимальное угловое ускорение $\varepsilon_m = 10 \text{ рад/с}^2$, коэффициент усиления регулятора $K = 10$. Учитывая рекомендации по выбору величины постоянной времени ФНЧ для работы ЭПФС в области низких частот вращения [6], имитационное моделирование было проведено для пограничных значений постоянной времени фильтра $T_\phi = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ($T_\phi = 0,1 T_k$) и $T_\phi = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ($T_\phi = 0,125 T_k$).

Фазовые портреты процесса синхронизации электропривода, полученные на каждом этапе исследования обеих имитационных моделей, были объединены в одну координатную плоскость с помощью встроенных механизмов программного комплекса Matlab. На графике (рис. 5) изображены фазовые портреты модели аналогового ЭПФС (рис. 4а) при значении множителя частоты дискретизации $N = 50$, $N = 90$, фазовые портреты линеаризованной системы с ФНЧ и без демодулятора, а также фазовые портреты модели цифрового ЭПФС (рис. 4б) при $N = 15$ и $N = 30$. Стрелками на графиках обозначено направление перемещения рабочей точки от начала моделирования (1) до завершения процесса синхронизации ЭПФС (3), расположенная на линии переключения ИЧФД, соответствует переходу электропривода в пропорциональный режим.

Обобщенный анализ сгруппированных графических зависимостей позволил сделать следующие выводы:

1. Кривые на этапе разгона или торможения электропривода (выходной сигнал ИЧФД постоянен) при исследовании аналоговой и цифровой

модели совпадают до достижения линии переключения ИЧФД в режим фазового сравнения ($da = \varphi_0/2$), независимо от частоты дискретизации. Соответственно, в этих режимах работы ЭПФС применение рассматриваемых устройств демодуляции не вносит дополнительных искажений в передачу сигнала.

2. При работе цифровой системы управления ЭПФС переход из режима разгона или торможения в пропорциональный происходит с задержкой на один такт квантования. Но за счет того, что величина периода дискретизации в ЦСАУ обычно меньше постоянной времени ФНЧ в аналоговой системе, вносимые задержки в процесс синхронизации электропривода значительно ниже, а форма фазовой траектории ближе к исходному аналоговому прототипу. Кроме того, величина запаздывания на один такт квантования может быть скомпенсирована за счет анализа выходного состояния режима работы ИЧФД и введения дополнительной логики в алгоритм управления.

3. Для аналоговой системы управления ЭПФС существует пороговое значение частоты дискретизации ШИМ, ниже которого происходит значительное искажение формы фазового портрета, и возрастание величины пульсации угловой ошибки в пропорциональном режиме работы, которое может быть определено соотношением (диапазон соответствует выбранным граничным значениям постоянной времени ФНЧ):

$$\omega_a \approx (45...50)\omega_{cp}.$$

4. Для цифровой системы управления ЭПФС с демодулятором на основе СВХ ниже граничное значение частоты дискретизации в системе может быть определено на основе соотношения:

$$\omega_d \approx 15\omega_{cp}.$$

5. Сопоставив выражения для ω_a и ω_d , можно сделать вывод, что применение цифровой системы управления позволяет расширить диапазон работы ЭПФС в области низких частот по сравнению с аналоговой системой приблизительно в 3 раза относительно частоты среза замкнутой линеаризованной системы.

6. Учитывая, что величина сигнала задания электропривода f_{on} обратно пропорциональна числу меток оптического преобразователя частоты Z , выражения для нижней границы частоты вращения при использовании для демодуляции аналогового и цифрового устройства в ЭПФС могут быть представлены в виде:

$$f_{on(аналог)} = \frac{(90...100)\pi\omega_{cp}}{Z},$$

$$f_{on(цифров)} = \frac{30\pi\omega_{cp}}{Z}.$$

Заключение

Систематизация и анализ полученных результатов исследования разработанных имитационных моделей позволили сформулировать частотные критерии применения основных способов демодуляции выходного сигнала ИЧФД в электроприводе с фазовой синхронизацией. При этом применение цифровых устройств и соответствующих им методов ис-

следования и проектирования позволяют создавать прецизионные электроприводы с фазовой синхронизацией с расширенным диапазоном регулирования в области низких частот вращения.

Благодарности / Acknowledgments

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю — доктору технических наук, профессору Омского государственного технического университета Бубнову Алексею Владимировичу — за помощь в работе над материалами статьи.

The author expresses his deep gratitude to his scientific supervisor — Doctor of Technical Sciences, Professor of Omsk State Technical University A. V. Bubnov — for his assistance with the article materials.

Список источников / References

1. Фалеев М. В., Киселев А. А., Самок С. Г. Импульсно-фазовые электроприводы мехатронных устройств // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2007. № 3. С. 27–30. EDN: PJJZND.
2. Faleyev M. V., Kiselev A. A., Samok S. G. Impul'sno-fazovyye elektropriyvody mekhatronnykh ustroystv [Pulse-phase electric drives of mechatronic appliances]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2007. No. 3. P. 27–30. EDN: PJJZND. (In Russ.).
3. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-locked loop techniques. A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 43, no. 6. P. 609–615. DOI: 10.1109/41.544547.
4. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 101 с. ISBN 978-5-8149-0988-6. EDN: QMLEQP.
5. Bubnov A. V., Bubnova T. A., Fedorov V. L. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya teorii sinkhronno-sinfaznogo elektropriyvoda [Current state and perspectives of the synchronous-common-mode electric drive theory]. Omsk, 2010. 101 p. ISBN 978-5-8149-0988-6. EDN: QMLEQP. (In Russ.).
6. Бубнов А. В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Электричество. 2005. № 5. С. 27–31. EDN: KUZWBV.
7. Bubnov A. V. Matematicheskaya model' logicheskogo ustroystva sravneniya dlya elektropriyvoda s fazovoy sinkhronizatsiyey [The mathematical model of a logic comparator for an electric drive with phase synchronization]. *Elektrichestvo. Electricity*. 2005. No. 5. P. 27–31. EDN: KUZWBV. (In Russ.).
8. Laopoulos T. L., Karybakas C. A. A phase locked motor speed control system with sample-and-hold phase detector. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1988. Vol. 35 (2). P. 245–252. DOI: 10.1109/41.192656.
9. Бубнов А. В., Дайнович А. М. Особенности применения фильтра нижних частот для демодуляции информационных сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78. EDN: JYGOQK.
10. Bubnov A. V., Daynovich A. M. Osobennosti primeneniya fil'tra nizhnikh chastot dlya demodulyatsii informatsionnykh signalov v elektropriyvode s fazovoy sinkhronizatsiyey [Features of using low-pass filter for small signal demodulation in phase-locking motor drive]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78. EDN: JYGOQK. (In Russ.).
11. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. Москва: Энергоиздат, 1982. 169 с.

Trakhtenberg R. M. Impul'snyye astaticheskiye sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniyem [Pulse astatic electric drive systems with discrete control]. Moscow, 1982. 169 p. (In Russ.).

8. Bubnov A. V., Daynovich A. M. Digital automatic control system of phase-lock motor drive. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines"*, Dynamics 2017: Proceedings. Omsk, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239439. EDN: XXMJZB.

9. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Алгоритм работы компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора и его реализация в приложении Simulink пакета программ Matlab // Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 122–126. EDN: OFSNQD.

Bubnov A. V., Chudinov A. N., Emashov V. A. Algoritm raboty komp'yuternoy modeli impul'nogo chastotno-fazovogo diskriminatora i ego realizatsiya v prilozhenii Simulink paketa programm Matlab [The algorithm of work of computer model of pulse frequency-phase discriminator and its development in Simulink application from Matlab software]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2010. No. 3 (93). P. 122–126. EDN: OFSNQD. (In Russ.).

10. Изерман Р. Цифровые системы управления / пер. с англ. С. П. Забродина, А. И. Титкова, А. В. Шалашова; под ред. И. М. Макарова. Москва: Мир, 1984. 541 с.

Izerman R. Tsifrovyye sistemy upravleniya [Digital control systems] / trans. from Engl. S. P. Zabrodina, A. I. Titkova, A. V. Shalashova; ed. by I. M. Makarov. Moscow, 1984. 541 p. (In Russ.).

11. Филиповский В. М., Полюга Н. Л., Мухамбедьяров Б. Б. Синтез дискретного регулятора переоборудованием с учётом задержки в вычислительном устройстве // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12, № 4. С. 136–144. DOI: 10.18721/JCSTCS.12411. EDN: LRRWMY.

Filipovskiy V. M., Polyuga N. L., Mukhamed'yarov B. B. Sintez diskretnogo regul'yatora pereoborudovaniyem s uchlatom zaderzhki v vychislitel'nom ustroystve [Synthesis of the discrete regulator by re-equipment method taking into account the delay in a computer device]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikatsii. Upravleniye. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computing, Telecommunications and Control System*. 2019. Vol. 12, no. 4. С. 136–144. DOI: 10.18721/JCSTCS.12411. EDN: LRRWMY. (In Russ.).

12. Лысов В. Е., Поляков В. А. Анализ влияния периода дискретности экстраполятора нулевого порядка цифровой

системы автоматического управления на динамические показатели качества управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31, № 1 (77). С. 34–46. DOI: 10.14498/tech.2023.1.3. EDN: ARIDRW.

Lysov V. E., Polyakov V. A. Analiz vliyaniya perioda diskretnosti ekstrapol'yatora nulevogo por'yadka tsifrovoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya [Analysis of the influence of the discrete period of the zero-order hold of the digital automatic control system on dynamic indicators of control quality] *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2023. Vol. 12, no. 31 (1). P. 34–46. DOI: 10.14498/tech.2023.1.3. (In Russ.).

ДАЙНОВИЧ Александр Михайлович, аспирант кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 3076-2474

AuthorID (РИНЦ): 897061

Адрес для переписки: dainovich-alex@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025; принята к публикации 15.07.2025.

DAYNOVICH Aleksandr Mikhaylovich, Postgraduate at the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 3076-2474

AuthorID (RSCI): 897061

Correspondence address: daiRSCInovich-alex@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 11.06.2025; approved after reviewing 14.07.2025; accepted for publication 15.07.2025.

МОДЕЛИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Б. Р. Саидмуродов, С. Е. Кокин

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

В статье рассматриваются модели прогнозирования энергопотребления электродуговых печей с использованием методов машинного обучения. Изучены классические подходы, такие как анализ временных рядов, регрессионные модели и методы экспоненциального сглаживания, а также современные технологии, включая градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM) и нейронные сети (LSTM, CNN). Особое внимание уделено методам оптимизации параметров, таким как перебор по сетке (Grid Search), генетические алгоритмы и байесовская оптимизация, которые повышают точность и адаптивность моделей. Рассматриваются преимущества гибридных моделей, объединяющих классические и машинные методы для учета как линейных, так и нелинейных зависимостей. Обсуждаются практические аспекты внедрения предложенных подходов в управление энергопотреблением, направленные на снижение затрат, повышение устойчивости и оптимизацию производственных процессов.

Ключевые слова: прогнозирование энергопотребления, дуговые сталеплавильные печи, машинное обучение, нейронные сети, управление энергопотреблением, оптимизация параметров, интеллектуальные системы управления, большие данные.

Для цитирования: Саидмуродов Б. Р., Кокин С. Е. Модели оперативного прогнозирования энергопотребления дуговых сталеплавильных печей с использованием методов машинного обучения // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 79–84. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-79-84. EDN: JDQCC.



© Саидмуродов Б. Р., Кокин С. Е., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELS FOR OPERATIONAL FORECASTING OF ENERGY CONSUMPTION IN ELECTRIC ARC FURNACES USING MACHINE LEARNING METHODS

B. R. Saidmurodov, S. E. Kokin

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

The article examines models for forecasting the energy consumption of electric arc furnaces using machine learning methods. Classical approaches such as time series analysis, regression models, and exponential smoothing methods are studied, along with modern techniques including gradient boosting (XGBoost, LightGBM) and neural networks (LSTM, CNN). Special attention is given to parameter optimization methods, such as grid search, genetic algorithms, and Bayesian optimization, which enhance the accuracy and adaptability of the models. The advantages of hybrid models integrating classical and machine learning methods to account for linear and nonlinear dependencies are highlighted. Practical applications of the proposed approaches in energy consumption management are discussed, aiming at cost reduction, improved sustainability, and production process optimization.

Keywords: energy consumption forecasting, electric arc furnaces, machine learning, neural networks, energy consumption management, parameter optimization, intelligent control systems, Big Data.



Введение

Управление энергопотреблением в электродуговых печах (ЭДП) остается критически важной задачей для повышения энергоэффективности металлургических процессов. Точное прогнозирование энергопотребления позволяет оптимизировать производственные процессы и снижать затраты, что способствует устойчивому развитию промышленности.

Современные достижения в области машинного обучения открывают новые возможности для решения задач прогнозирования. Эти методы позволяют анализировать сложные закономерности в данных, создавая более точные и адаптивные модели энергопотребления. Использование таких технологий позволяет промышленным предприятиям оперативно реагировать на изменения условий энергоснабжения (колебания напряжения и частоты сети, перебои в подаче электроэнергии), состава сырья (химический и фракционный состав, температура шихты), технологических режимов (характеристики дугового разряда, износ электродов, состояние футеровки, эффективность системы охлаждения) и экономических факторов (изменение тарифов, оптимизация затрат на энергоресурсы). Кроме того, такие технологии обеспечивают адаптацию к колебаниям спроса на продукцию, снижая удельное энергопотребление и повышая общую эффективность металлургического производства.

Цель данного исследования — анализ существующих подходов к прогнозированию энергопотребления в ЭДП и выявление перспективных направлений их дальнейшего применения. Также рассматривается интеграция методов машинного обучения с отраслевыми знаниями для решения специфических задач в данной области.

1. Классические подходы к прогнозированию энергопотребления

Классические методы широко применяются для прогнозирования энергопотребления, однако имеют ряд ограничений при работе с динамическими и сложными системами:

— метод ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average): используется для анализа временных рядов, эффективен для стационарных данных и учета сезонности. Однако требует сложной предварительной обработки данных и плохо справляется с нестабильными или сильно изменяющимися параметрами [1–2];

— методы экспоненциального сглаживания: просты в реализации и эффективны для краткосрочных прогнозов, но не учитывают сложные нелинейные зависимости [3];

— регрессионные модели: позволяют анализировать линейные зависимости между переменными, но требуют больших объемов данных и не работают в условиях нелинейной динамики [4].

В табл. 1 представлены преимущества и недостатки этих классических методов.

Исследования продемонстрировали практическое применение этих классических методов в прогнозировании энергопотребления, выявляя как их преимущества, так и ограничения. Например, работы [1–2] показывают, что метод ARIMA эффективно моделирует стационарные временные ряды, выявляя тренды и сезонность, однако испытывает трудности при работе с нестабильными данными. В исследованиях, таких как [3], методы экспоненциального сглаживания успешно применялись для краткосрочного прогнозирования, демонстрируя свою простоту и адаптивность, но не способные учитывать нелинейные зависимости. Аналогично, регрессионные модели в [4] оказались эффективными для выявления линейных зависимостей, однако их точность снижается при доминировании нелинейных факторов в системе. Эти исследования подчеркивают важность классических методов, одновременно указывая на необходимость их дальнейшего усовершенствования путем внедрения гибридных моделей и методов машинного обучения для более точного прогнозирования в современных промышленных условиях.

В статьях [5–9] также активно рассматриваются усовершенствования традиционных подходов. Так, в работе [5] предложена комбинация методов ARIMA и экспоненциального сглаживания с применением техники Bagging для повышения точности средне- и долгосрочного прогноза энергопотребления. Авторы демонстрируют, что использование ансамблевых стратегий может значительно повысить устойчивость моделей к флуктуациям данных.

В статье [6] обсуждаются методы компенсации гармоник и искажений, возникающих в электросетях, с применением смешанных и стационарных репетитивных регуляторов. Хотя работа ориентирована на силовую электронику, она содержит полезные идеи по использованию математических моделей для предсказания и коррекции энергопотребления в промышленных условиях.

Работа [7] демонстрирует применение современных методов анализа временных рядов в области медицины, но содержащиеся в ней методологические подходы — особенно по части предобработки данных и выявления скрытых закономерностей — легко адаптируются к задачам энергопотребления. Это подчеркивает междисциплинарный потенциал временных моделей.

Особое внимание заслуживает исследование [8], в котором подробно анализируются статистические методы прогнозирования потребления электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах. Авторы используют регрессионное моделирование, опираясь на реальные производственные данные, что придает их выводам высокую прикладную значимость. Результаты показывают, что точность прогноза можно существенно повысить при наличии корректной информации о технологическом процессе и параметрах оборудования.

Данные исследования подчеркивают важность классических методов, одновременно указывая

Таблица 1. Преимущества и недостатки классических методов
Table 1. Advantages and disadvantages of classical methods

Метод	Преимущества	Недостатки
ARIMA	— эффективен для стационарных временных рядов; — учитывает сезонность и тренды	— требует сложной предобработки данных; — неэффективен при нестабильных данных
Методы экспоненциального сглаживания	— просты в реализации и интерпретации; — эффективны для краткосрочных прогнозов	— ограничены для сложных многокомпонентных систем; — не учитывают нелинейные зависимости
Регрессионные модели	— легко анализируют линейные зависимости; — хорошо работают при наличии четких связей между переменными	— не пригодны для нелинейных зависимостей; — требуют больших объемов данных

Таблица 2. Сравнение методов машинного обучения
Table 2. Comparison of machine learning methods

Метод	Преимущества	Применение
XGBoost	высокая точность, способность моделировать нелинейности	прогнозирование в сложных средах данных
LightGBM	высокая скорость обработки, эффективность	работа с крупными объемами данных
LSTM	учет долгосрочных зависимостей	прогнозирование временных рядов, анализ энергопотребления в реальном времени
CNN	анализ структурированных данных, выявление скрытых закономерностей	анализ временных рядов со сложными закономерностями

на необходимость их дальнейшего усовершенствования путем внедрения гибридных моделей и методов машинного обучения для более точного прогнозирования в современных промышленных условиях.

Расширение классических подходов

Для исключения недостатков, присущих классическим методам прогнозирования энергопотребления, была предложена их комбинация с более современными. Одним из таких решений являются гибридные модели, которые сочетают классические методы, такие как ARIMA и регрессионный анализ, с алгоритмами машинного обучения, например, методом опорных векторов (SVM) и искусственными нейронными сетями. Такой подход позволяет моделям учитывать как линейные, так и нелинейные зависимости в данных энергопотребления. Например, в [1–2] показано, что комбинация модели ARIMA с SVM может существенно снизить погрешность прогнозирования. Этот положительный эффект происходит по двум причинам: в ARIMA учитываются линейные участки в данных, а в SVM — нелинейные зависимости.

Кроме того, в процессе исследования применялись методы экспоненциального сглаживания, что позволило повысить точность прогнозирования. В работе [3] рассматривается сочетание экспоненциального сглаживания с многоканальным анализом синхронных кадров, что способствует точному определению гармоник в промышленных электрических системах, таких как электропечи. Данное усовершенствование способствует повышению стабильности и эффективности управления в динамичных промышленных условиях.

Дополнительно были адаптированы регрессионные модели для работы с нелинейными зависимостями. В исследовании [4] показано, что гауссовы процессы регрессии (GPR) способны существенно повысить точность прогнозов за счет моделирования сложных связей между переменными, что делает их более эффективными по сравнению с традиционными линейными моделями. Одним

из ключевых факторов успешного применения является корректный выбор гиперпараметров, который влияет на результаты при промышленном использовании.

В статье [9] описан практический пример построения статистической модели для прогнозирования энергопотребления дуговых печей на основе производственных данных. Использование регрессионных методов в сочетании с эмпирической калибровкой параметров позволило авторам добиться высокой корреляции между предсказанными и фактическими значениями, что подтверждает применимость моделей в реальных производственных условиях.

Кроме того, особое внимание уделяется этапу предобработки данных. Методы нормализации, устранения сезонности и шумоподавления способствуют повышению качества входных данных и, соответственно, точности прогнозов. В статье [8] рассматриваются алгоритмы анализа и моделирования временных рядов в медицинских системах, однако предложенные техники имеют универсальный характер и могут быть успешно адаптированы для задач энергетики. Это также согласуется с выводами из [7], где подчеркивается важность выбора корректного представления сигнала и использования подходящих преобразований координат для повышения точности анализа.

Помимо этого, всё чаще применяются ансамблевые методы, которые позволяют объединить прогнозы нескольких моделей, тем самым повышая надежность системы за счёт уменьшения риска переобучения. Такие методы находят своё отражение в статьях [5, 9], где показано, что совмещение результатов различных моделей даёт лучшие прогнозные характеристики, чем использование одного подхода.

2. Прогнозирование на основе машинного обучения

Методы машинного обучения обеспечивают высокую адаптивность и точность при анализе данных

Таблица 3. Сравнение методов оптимизации
Table 3. Comparison of optimization methods

Метод	Преимущества	Ограничения
Grid Search	— простой и интуитивно понятный; — гарантирует нахождение лучшей комбинации	— ресурсоёмкий в высокоразмерных пространствах; — ограничена эффективность при сложных задачах
Генетические алгоритмы	— эффективны в сложных, высокоразмерных задачах; — избегают локальных минимумов	— требуют точной настройки эволюционных параметров; — могут требовать больше итераций для сходимости
Байесовская оптимизация	— эффективное исследование пространства параметров; — адаптируется к изменениям данных	— сложна в реализации; — зависимость от начальных предположений

в динамических условиях. Среди наиболее эффективных подходов можно выделить:

— градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM) [10–11]: позволяет успешно моделировать сложные нелинейные зависимости и широко применяется в промышленности для анализа больших объемов данных;

— рекуррентные нейронные сети (LSTM) [12]: подходят для моделирования временных зависимостей и долгосрочных трендов, что делает их особенно эффективными при прогнозировании энергопотребления в реальном времени;

— сверточные нейронные сети (CNN) [13–15]: демонстрируют высокую эффективность в анализе структурированных данных и выявлении скрытых закономерностей в сложных наборах данных.

В табл. 2 представлено сравнение методов машинного обучения.

Методы машинного обучения предоставляют значительные преимущества перед классическими подходами благодаря способности моделировать сложные нелинейные зависимости и обеспечивать более высокую точность. Например, алгоритмы градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM) широко используются в прогнозировании сложных сред данных благодаря их скорости и эффективности в обработке больших объемов информации. Рекуррентные нейронные сети (LSTM) наиболее эффективны при прогнозировании временных рядов, так как способны моделировать долгосрочные зависимости и тренды, что особенно важно для анализа энергопотребления в реальном времени.

Развитие методов машинного обучения

Для повышения точности прогнозирования энергопотребления активно разрабатываются гибридные и ансамблевые подходы, объединяющие преимущества различных алгоритмов. Эти методы обеспечивают адаптивность и высокую точность в условиях изменяющихся данных, что особенно актуально в промышленных приложениях.

Одним из наиболее эффективных решений является интеграция градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM) с рекуррентными нейронными сетями (RNN) или сетями долгой краткосрочной памяти (LSTM). Такие комбинации позволяют учитывать как нелинейные зависимости, так и временные характеристики данных, что особенно важно для анализа энергопотребления. В частности, исследования [10, 11] демонстрируют преимущества LightGBM в обработке больших объемов данных, делая его особенно полезным для прогнозирования энергопотребления в реальном времени.

Кроме того, гибридные модели, основанные на сверточных нейронных сетях (CNN) и LSTM,

показывают высокую эффективность при анализе сложных закономерностей энергопотребления. CNN позволяет выявлять пространственные зависимости в структурированных данных, в то время как LSTM эффективно моделирует временные тренды [13–15]. Данные подходы успешно применяются в энергетических системах, что подтверждается исследованиями [13–17], посвященными анализу качества электроэнергии в электродуговых печах.

Масштабируемость моделей машинного обучения позволяет реализовывать их в реальном времени на промышленных объектах. Облачные решения и технологии периферийных вычислений, представленные в [10, 11], способствуют снижению задержек и увеличению оперативности анализа данных.

3. Оптимизация параметров и адаптация моделей

В процессе разработки моделей машинного обучения одной из ключевых задач является оптимизация гиперпараметров, позволяющая повысить точность прогнозирования. Существует несколько эффективных методов оптимизации параметров моделей:

— Grid Search — метод полного перебора, при котором последовательно оцениваются все возможные комбинации гиперпараметров. Хотя этот подход гарантирует нахождение оптимального набора параметров, его вычислительная сложность значительно возрастает при увеличении размерности пространства параметров;

— генетические алгоритмы — основаны на принципах естественного отбора, таких как селекция, скрещивание и мутация. Эти алгоритмы особенно эффективны для поиска оптимальных параметров в сложных многомерных пространствах, где традиционные методы могут оказаться неэффективными;

— байесовская оптимизация — вероятностный метод, учитывающий неопределенность и использующий информацию из предыдущих экспериментов для эффективного исследования пространства параметров. Этот метод особенно полезен при работе с ограниченными вычислительными ресурсами.

Эти методы играют важную роль в повышении точности прогнозирования и адаптации моделей к изменяющимся данным.

В табл. 3 представлено сравнение методов оптимизации.

Оптимизация играет ключевую роль в создании адаптивных моделей, способных обрабатывать динамические и сложные данные. Grid Search является надежным методом для небольших и средне-сложных задач, но его высокая вычислительная

Таблица 4. Эффективность гибридных моделей
Table 4. Efficiency of hybrid models

Модель	Точность прогнозирования	Скорость обработки	Применимость
ARIMA + LSTM	Высокая	Средняя	Сложные временные ряды
XGBoost + CNN	Высокая	Высокая	Большие объемы структурированных данных

стоимость ограничивает применимость для крупных моделей. Генетические алгоритмы обеспечивают надежные решения в многомерных пространствах, позволяя избегать локальных минимумов, что делает их полезными для неконвексных задач оптимизации.

Байесовская оптимизация представляет собой более продвинутый подход [18, 19]. В данных работах описывают сложные модели и методы управления ЭДП, которые используют вероятностные модели для приоритизации поиска в наиболее перспективных областях пространства параметров. Благодаря способности адаптироваться к данным этот метод эффективен при наличии неопределенности и ограниченных вычислительных ресурсов.

4. Гибридные подходы

Гибридные модели объединяют преимущества классических методов и машинного обучения, что позволяет значительно улучшить точность прогнозирования и адаптивность моделей:

— ARIMA + LSTM — модель ARIMA используется для выявления трендов и сезонности в данных, а рекуррентные нейронные сети LSTM применяются для анализа нелинейных зависимостей и учета долгосрочных временных зависимостей. Такой подход позволяет учитывать как линейные, так и нелинейные компоненты данных, что делает его эффективным для прогнозирования временных рядов.

— XGBoost + CNN — сочетание градиентного бустинга XGBoost и сверточных нейронных сетей CNN позволяет учитывать как временные зависимости, так и структурные особенности данных. XGBoost эффективно обрабатывает нелинейные зависимости и сложные паттерны, тогда как CNN распознает скрытые структуры в данных, что делает этот метод особенно полезным при обработке больших объемов данных.

Исследования показывают, что комбинация ARIMA и LSTM позволяет достичь точности прогнозирования свыше 95 % [1–2, 7, 14, 15], значительно превосходя отдельные модели. Гибридные модели позволяют учитывать широкий спектр факторов, влияющих на потребление энергии, что делает их особенно ценными для промышленных приложений [14–17].

В табл. 4 представлена эффективность гибридных моделей.

Преимущества гибридных подходов

Гибридные модели обеспечивают более высокую точность прогнозирования и устойчивость к изменению данных. Они сочетают преимущества классического анализа временных рядов (например, выявление трендов и сезонности с помощью ARIMA) с возможностями машинного обучения (например, моделирование нелинейных зависимостей с помощью LSTM или извлечение признаков с использованием CNN).

В промышленности такие модели особенно полезны для прогнозирования потребления энергии, где данные подвержены как сезонным колебаниям,

так и резким изменениям. Они также применяются для предсказания отказов оборудования, анализа рыночного спроса и планирования производства.

5. Обсуждение: достижения и перспективные направления в прогнозировании энергопотребления

Несмотря на высокую эффективность, гибридные модели требуют тщательной настройки. Например, для интеграции ARIMA и LSTM необходимо правильно выбрать параметры обеих моделей и определить способ объединения их выходных данных. XGBoost и CNN также требуют значительных вычислительных ресурсов и оптимизации.

Будущие исследования будут сосредоточены на разработке более эффективных алгоритмов, способных автоматически адаптироваться к изменяющимся данным. Также перспективным направлением является использование ансамблевых методов и метамоделирования, что позволит создавать еще более устойчивые и точные прогнозные системы, связанные с энергопотреблением ЭДП [18, 19].

В долгосрочной перспективе развитие интеллектуальных и адаптивных систем управления энергопотреблением сыграет ключевую роль в повышении эффективности промышленного производства и сокращении издержек [16–19], что соответствует глобальным целям энергоэффективности и устойчивого развития не только металлургической отрасли, но и всех отраслей, в которых применяется электроэнергия.

Благодарности / Acknowledgments

Авторы выражают искреннюю благодарность Исмоилу Назримадовичу Одинаеву за ценные комментарии и качественное редактирование текста, что значительно улучшило читаемость и краткость статьи. Также выражается глубокая благодарность Муродбеку Холназаровичу Сафаралиеву за предоставление доступа к необходимым данным и информационным ресурсам, что позволило провести более глубокий анализ исследования.

The authors express their sincere gratitude to Ismail Nazrimadovich Odinaev for valuable comments and high-quality editing of the text, which significantly improved the readability and conciseness of the article. Deep gratitude is also expressed to Murodbek Kholnazarovich Safaraliev for providing access to the necessary data and information resources, which allowed for an in-depth analysis of the study.

Список источников / References

- Sen P., Roy M., Pal P. Application of ARIMA for forecasting energy consumption and GHG emission: A case study of an Indian pig iron manufacturing organization. *Energy*. 2016. Vol. 116. P. 1031–1038. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114946.
- Nie H., Liu G., Liu X., Wang Y. Hybrid of ARIMA and SVMs for short-term load forecasting. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 16, part C. P. 1455–1460. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.01.229.

3. Balouji E., Salor Ö., Ermis M. Exponential smoothing of multiple reference frame components with GPUs for real-time detection of time-varying harmonics and interharmonics of EAF currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 54 (6). P. 6566–6575. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101815.
4. Reimann A., Hay T., Echterhof T. [et al.]. Application and evaluation of mathematical models for prediction of the electric energy demand using plant data of five industrial-size EAFs. *Metals*. 2021. Vol. 11, no. 9. P. 1348. DOI: 10.3390/met11091348.
5. Sen P., Roy M., Pal P. Application of ARIMA for forecasting energy consumption and GHG emission: A case study of an Indian pig iron manufacturing organization. *Energy*. 2016. Vol. 116, Part 1. P. 1031–1038. DOI: 10.1016/j.energy.2016.10.068.
6. Oliveira E. M., Oliveira F. L. C. Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods. *Energy*. 2018. Vol. 144. P. 776–788. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.049.
7. Loh P. C., Tang Y., Blaabjerg F., Wang P. Mixed-frame and stationary-frame repetitive control schemes for compensating typical load and grid harmonics. *IET Power Electronics*. 2011. Vol. 4, issue 2. P. 218–226. DOI: 10.1049/iet-pel.2009.0222.
8. Егоров Д. Б., Захаров С. Д., Егорова А. О. Современные методы анализа и прогнозирования временных рядов и их применение в медицине // Врач и информационные технологии. 2020. № 1. С. 21–26. DOI: 10.37690/1811-0193-2020-1-21-26. EDN: HRGODU.
- Egorov D. B., Zakharov S. D., Egorova A. O. Sovremennyye metody analiza i prognozirovaniya vremennykh ryadov i ikh primeneniye v meditsine [Modern methods of analysis and forecasting of time series and use in medicine]. *Vrach i informatsionnyye tekhnologii. Medical Doctor and Information Technologies*. 2020. No. 1. P. 21–26. DOI: 10.37690/1811-0193-2020-1-21-26. EDN: HRGODU. (In Russ.).
9. Carlsson L. S., Samuelsson P. B., Jönsson P. G. Predicting the electrical energy consumption of electric arc furnaces using statistical modeling. *Metals*. 2019. Vol. 9 (9). 959. DOI: 10.3390/met9090959.
10. Yang L., Li Z., Hu H. [et al.]. Evaluation of energy utilization efficiency and optimal energy matching model of EAF steelmaking based on association rule mining. *Metals*. 2024. Vol. 14 (4). 458. DOI: 10.3390/met14040458.
11. Zhuo Q., Al-Harbi M. N., Pistorius P. C. Feature engineering to embed process knowledge: Analyzing the energy efficiency of electric arc furnace steelmaking. *Metals*. 2025. Vol. 15 (1). DOI: 10.3390/met15010013.
12. Chavosh Nejad M., Hadavandi E., Nakhostin M. M., Mehmanpazir F. A data-driven model for energy consumption analysis along with sustainable production: A case study in the steel industry. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44 (2) P. 3360–3380. DOI: 10.1080/15567036.2022.2064943.
13. Pănoiu M., Pănoiu C. Hybrid deep neural network approaches for power quality analysis in electric arc furnaces. *Mathematics*. 2024. Vol. 12 (19). 3071. DOI: 10.3390/math12193071.
14. Carlsson L. S., Samuelsson P. B., Jönsson P. G. Using statistical modeling to predict the electrical energy consumption of an electric arc furnace producing stainless steel. *Metals*. 2020. Vol. 10 (1). 36. DOI: 10.3390/met10010036.
15. Gajic D., Gajic I. S., Savic I. [et al.]. Modelling of electrical energy consumption in an electric arc furnace using artificial neural networks. *Energy*. 2016. Vol. 108. P. 132–139. DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.068.
16. Kirschen M., Risonarta V., Pfeifer H. Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry. *Energy*. 2009. Vol. 34 (9). P. 1065–1072. DOI: 10.1016/j.energy.2009.04.015.
17. Trejo E., Martell F., Micheloud O. [et al.]. A novel estimation of electrical and cooling losses in electric arc furnaces. *Energy*. 2012. Vol. 42 (1). P. 446–456. DOI: 10.1016/j.energy.2012.03.024.
18. Fathi A., Saboohi Y., Škrjanc I., Logar V. Comprehensive electric arc furnace model for simulation purposes and model-based control. *Steel Research International*. 2016. Vol. 83. 600083. DOI: 10.1002/srin.201600083.
19. Keplinger T., Haider M., Steinparzer T. [et al.]. Modeling, simulation, and validation with measurements of a heat recovery hot gas cooling line for electric arc furnaces. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. 1800009. DOI: 10.1002/srin.201800009.

САИДМУРОДОВ Бегмурод Рахимбекович, аспирант кафедры автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени Первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург.
Адрес для переписки: saitov.fso@bk.ru
КОКИН Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем УрФУ, г. Екатеринбург.
SPIN-код: 4769-7497
AuthorID (РИНЦ): 610636
ORCID: 0000-0001-7493-172X
AuthorID (SCOPUS): 24577707300
Адрес для переписки: s.e.kokin@urfu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 12.06.2025; принята к публикации 01.07.2025.

SAIDMURODOV Begmurod Rakhimbekovich, Postgraduate of the Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Yekaterinburg.
Correspondence address: saitov.fso@bk.ru
KOKIN Sergey Evgenievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Automated Electrical Systems Department, UrFU, Yekaterinburg.
SPIN-code: 4769-7497
AuthorID (RSCI): 610636
ORCID: 0000-0001-7493-172X
AuthorID (SCOPUS): 24577707300
Correspondence address: s.e.kokin@urfu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 01.04.2025; approved after reviewing 12.06.2025; accepted for publication 01.07.2025.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

А. Ю. Турыбрин^{1,2}, А. В. Бубнов¹, А. Н. Четверик¹

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²ООО «Транснефть Надзор» ОП «Омское УСК», г. Омск

Лазерное сканирование представляет собой перспективный метод контроля в строительстве, обеспечивающий высокую точность и скорость измерений. Наземное лазерное сканирование является одним из ключевых инструментов в рамках BIM-технологий, обеспечивая получение точных данных о размере, положении и отклонении объектов. В статье анализируются различные сферы применения наземного лазерного сканирования в строительстве и определяются приоритетные требования к техническим характеристикам оборудования. Отмечается важная роль системы электропривода в обеспечении высокой угловой точности сканирования. Проводится анализ существующих систем лазерного сканирования, технических особенностей применяемых конструкций электропривода, обеспечивающих высокую угловую точность, и определяются основные направления дальнейшего совершенствования систем привода. Рассматривается возможность применения систем управления электроприводом на основе фазовой автоподстройки частоты вращения для снижения затрат на сканирование без снижения угловой точности через оптимизацию конструкции электропривода. Уточняется, как усовершенствование электроприводов может способствовать более широкому применению наземного лазерного сканирования в строительстве.

Ключевые слова: ФАПЧВ, электропривод, наземное лазерное сканирование, BIM-технологии, угловая точность, энкодер, фрикционная муфта, строительный контроль.

Для цитирования: Турыбрин А. Ю., Бубнов А. В., Четверик А. Н. Усовершенствование конструкции электропривода лазерных сканеров на основе анализа особенностей применения сканирующих устройств в строительной отрасли // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 85–94. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-85-94. EDN: UPJTZU.



© Турыбрин А. Ю., Бубнов А. В., Четверик А. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVEMENT OF OPTIMIZATION OF THE DRIVE DESIGN FOR LASER SCANNERS BASED ON THE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF SCANNING DEVICES IN CONSTRUCTION INDUSTRY

A. Yu. Turybrin^{1,2}, A. V. Bubnov¹, A. N. Chetverik¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²LLC "Transneft Nadzor" Omsk Separate division, Omsk, Russia

A laser scanning is a promising method of control in construction, providing high accuracy and speed of measurements. Terrestrial laser scanning is one of the key tools within the framework of Building Information Modeling technology, enabling the acquisition of precise data regarding the size, position, and deviation of objects. The article analyzes various areas of application of terrestrial laser scanning in construction and determines priority requirements for the technical specifications of the equipment. The significant role of the drive system in ensuring high angular accuracy of scanning is emphasized. An analysis of existing laser scanning systems is conducted, focusing on the technical features of drive designs that ensure high angular precision, and the main directions for further improvement of drive systems are determined. The possibility of applying electric drive control systems based on Phase-Locked Loop technology to reduce scanning costs without reducing angular accuracy through the optimization of electric drive design is considered.

It is clarified how the improvement of electric drives can facilitate the wider application of terrestrial laser scanning in construction.

Keywords: PLL, electric drive, terrestrial laser scanning, BIM technologies, angular accuracy, encoder, friction coupling, construction control.

For citation: Turybrin A. Yu., Bubnov A. V., Chetverik A. N. Improvement of optimization of the drive design for laser scanners based on the analysis of characteristics of scanning devices in construction industry. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 85–94. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-85-94. EDN: UPJTZU.



© Turybrin A. Yu., Bubnov A. V., Chetverik A. N., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Современные тенденции развития микропроцессорной техники и цифровых технологий со все большей автоматизацией различных сфер человеческой деятельности в значительной степени затронуло также и отрасли, непосредственно связанные с проектированием и строительством различных объектов, зданий и сооружений. Современное объектное проектирование осуществляется с применением различных систем автоматизированного проектирования (САПР) и имеет потребность в наличии актуальных исходных данных о местности и пространственном положении зданий и сооружений, окружающих объект проектирования. Проект, полученный с применением САПР, при необходимости в значительной мере позволяет вносить оперативные корректировки с проведением необходимых дополнительных прочностных расчетов уже по ходу реализации проекта на основе данных, полученных в ходе геодезических замеров, выполняемых как в ходе строительства, так и по его завершению. В последние годы широкое распространение получают BIM-технологии моделирования строительных объектов, которые касаются всех уровней жизненного цикла здания, в том числе разработки его проекта и технического задания, строительства, последующей эксплуатации и ремонта. Для эффективной реализации концепций, заложенных в BIM, одним из важнейших аспектов является оперативный и финальный контроль результатов выполненного строительства. Наземное лазерное сканирование (НАС) в условиях развивающихся BIM-технологий получает все большее распространение, поскольку оно позволяет оперативно и в удобной для дальнейшего применения цифровой форме дать представление о фактических размерах и имеющихся отклонениях вновь возводимого либо реконструируемого объекта и облегчить ведение исполнительной документации в цифровом формате.

Основными препятствиями для широкого применения лазерного сканирования в строительстве в настоящее время являются высокая стоимость оборудования и программного обеспечения, уязвимость оборудования к перегрузкам и ударным нагрузкам, а также ориентация производителей на собственное программное обеспечение, что усложняет совместное использование систем разных брендов. Кроме этого, необходимо учитывать специфический фактор, отличающий лазерное сканирование от классических геодезических методов контроля, выраженный в необходимости полной приостановки работ и исключение передвижений персонала в зоне сканирования для получения корректных данных. Это накладывает определенные требования по увеличению скорости выпол-

нения сканирования при сохранении требуемой точности.

Одним из важнейших параметров лазерного 3D-сканера, наряду с точностью измерения расстояний дальномером, является угловая точность измерений, которая напрямую зависит от применяемой в сканере системы электроприводов вращения. Электропривод в лазерных сканерах является ключевым элементом, отвечающим за точное позиционирование лазерного луча в пространстве.

Для оптимизации конструкции электропривода и повышения эффективности работы сканирующих устройств был проведен обзор существующих методов лазерного сканирования и технических характеристик современных лазерных сканеров в корреляции с имеющимися требованиями нормативных документов.

Проведён анализ существующих актуальных систем лазерного сканирования с акцентированием внимания к применяемым конструкциям электропривода, обеспечивающим высокую угловую точность при сохранении динамических характеристик привода. На основе одной из наиболее перспективных конструкций и имеющихся наработок в области прецизионных синхронных электроприводов на принципах фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) предложен вариант доработки электропривода лазерного сканера, потенциально позволяющий повысить скорость сканирования без снижения точности определения углового положения.

2. Цель исследования

В рамках данной работы была поставлена цель провести обзорное исследование основных востребованных направлений использования лазерного сканирования в строительной отрасли с анализом существующих требований нормативных документов, регламентирующих применение лазерного сканирования в строительстве. В ходе проведения анализа выполнить обзор актуальных конструкций существующих систем лазерного сканирования как отечественных, так и зарубежных разработок с определением перспективных направлений дальнейшего развития их конструкций с акцентированием особого внимания к применяемым к механизмам привода и направлениям по оптимизации конструкций их электроприводов. В рамках работы по оптимизации конструкции электропривода лазерного сканера рассмотреть перспективы применения в сканирующих лазерных системах электропривода, построенного на основе принципов фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). На основе полученных данных предложить принципиальную конструктивную схему электропривода на основе



Рис. 1. Классификация систем лазерного сканирования
Fig. 1. Classification of laser scanning systems

принципов ФАПЧВ для использования в конструкции лазерного сканера.

3. Основная часть

3.1 Общая классификация и принцип работы лазерных сканеров

Лазерные сканирующие системы можно классифицировать по нескольким основным параметрам, которые оказывают влияние на их применение в различных отраслях строительства (рис. 1) [1, 2].

Отдельно отмечена классификация по принципу действия применяемого дальномера в качестве основной классификации в рамках рассматриваемого вопроса. Принцип работы импульсных сканеров (Time-of-Flight (ToF)) основан на измерении расстояния по задержке излученного и принятого лазерного импульса. Данные сканеры в классическом исполнении обладают средней скоростью работы, эффективной дальностью работы до 1000 м и точностью работы, зависящей от отражающих свойств поверхности с погрешностью около 10 мм. Принцип работы фазового сканера основан на измерении разницы фазы волны между излученным и принятым сигналом. Максимальная дальность ограничена особенностями технологии и не превышает 100 м, данную технологию характеризует высокая скорость сканирования (до 1 миллиона точек/с) при средней точности работы с погрешностью до 10 мм. Принцип действия Триангуляционного сканера основан на измерении углов выхода/приема луча излучателем и приемником, которые расположены на некотором расстоянии друг от друга. Данная технология является наиболее точной (от 0,1 до 1 мм), однако её эффективная дальность не превышает 5 м [1].

Импульсные сканеры с оцифровкой сигнала (цифровой ToF) представляют собой дальнейшее развитие технологии импульсных сканеров, которые, сохранив большую дальность работы, получили существенную прибавку в точности и скорости работы, приблизившись по этим параметрам к фазовым и триангуляционным сканерам. Чаще всего эти технологии, применяемые в сканерах, у каждого производителя имеют свои собственные названия, например, у Leica это Waveform Digitising technology, а у Trimble — Trimble Lightning 3DM.

Согласно приведенным классификациям, для потребностей строительной отрасли наилучшим об-

разом подходят панорамные сканеры, построенные на основе принципа цифрового ToF, поскольку они имеют достаточную точность для выполнения измерений в соответствии с требованиями нормативных документов строительной отрасли и обладают универсальной дистанцией работы, которая может закрыть потребности строительной отрасли.

Кроме приведенных выше классификаций также существуют и другие классификации, в том числе основанные на основополагающих параметрах лазерного сканера, таких как дальность действия, точность, разрешение, скорость сканирования и частота измерения. Требования по данным параметрам предъявляются заказчиком сканирования и зачастую представляют собой корреляцию желаемой детализации результатов лазерного сканирования с финансовыми и временными затратами на их получение и обычно определяются и обосновываются исходя из поставленной задачи и отражаются в техническом задании на проведение лазерного сканирования.

3.2 Примеры применения лазерного сканирования в области строительства

На примерах научных работ, в которых исследуется характер использования лазерного сканирования на строительных объектах, можно выделить два основных направления и специфику использования наземного лазерного сканирования в строительстве:

А. Проведение лазерного сканирования уже существующих объектов и их окружения с целью получения исходных данных для дальнейших проектных работ по реконструкции объектов. Среди этого направления, в свою очередь, можно отдельно выделить:

A1. Сохранение архитектурного наследия. При создании трехмерных цифровых моделей памятников и исторических объектов основной задачей ставится исследование вопросов совместного использования НЛС и фотограмметрии, позволяющее получить облако точек с необходимыми характеристиками для создания параметрической цифровой модели исследуемого объекта, наличие которой позволит более эффективно планировать и выполнять реставрационные работы, а также планировать археологические изыскания [3]. При проведении последующего анализа BIM-модели, полученной с применением лазерного сканирования, могут быть обнаружены дефекты, которые невозможно было

установить ранее путем традиционных архитектурных обмеров и визуальных наблюдений, например, выявлены изменения в расположении несущих металлических балок перекрытия и искривление сводов потолка [4].

А2. Получение исходных данных при проектировании сложных объектов с применением BIM-технологий. Формирование баз данных производственных объектов. Еще одним вариантом применения технологии наземного лазерного сканирования является решение задачи формирования единого источника точных актуальных данных об активах промышленного объекта для последующего обеспечения доступа к данным участникам процессов проектирования, строительства и эксплуатации. Применение таких технологий позволяет выявить и предупредить ошибки проектирования и строительства на ранних этапах, повысив качество выполняемых работ [5].

Использование лазерного сканирования позволяет получить подробную 3D-модель существующих сооружений и окружающих их объектов, которая способствует не только оптимизации проектных работ, что позволяет сократить их длительность примерно на 20 %, но и способна существенно (до 10 %) снизить затраты на устранение ошибок на этапе строительного-монтажных работ, что в итоге удешевляет и ускоряет весь процесс реконструкции [6].

Б. Применение лазерного сканирования для оценки качества строительных работ, создания и контроля исполнительной документации

Использование НЛС при проведении строительного контроля позволяет получать информацию о соответствии объекта требованиям проектной документации в режиме реального времени, что, в свою очередь, позволяет значительно повысить точность и скорость выявления отклонений по каждому конструктивному элементу и дает возможность перенести ведение журнала работ по строительному контролю в информационную модель объекта. Применение НЛС в качестве инструментального метода контроля позволяет определить наличие отклонений строительных конструкций от проектных значений, сделать их качественную и количественную оценку и в сжатые сроки в случае необходимости принять решение о внесении изменений в проект или объ-

ект строительства. Организация рабочих процессов на основе информационной модели, в свою очередь, позволяет свести к минимуму непредвиденные расходы, повысить эффективность проектирования, а использование облака точек, полученного с помощью НЛС, позволяет повысить эффективность контроля за качеством производства строительного-монтажных работ и объединить информацию со строительной площадки и проектную модель в среде общих данных [7, 8].

Таким образом, наземное лазерное сканирование, являясь универсальным методом, применимо как для проведения строительного контроля новых объектов строительства, так и при мониторинге напряженных состояний строительных конструкций зданий и сооружений в период их эксплуатации.

3.3 Требования, предъявляемые к лазерным сканерам. Существующая нормативно-техническая документация (НТД)

На основе анализа различного характера применения НЛС для оценки качества строительного-монтажных работ и оценки текущего технического состояния существующих сооружений можно выделить два основных подхода использования данных, полученных с помощью НЛС, определяющих приоритетные технические параметры лазерных сканеров:

— **получение данных только для определения положения, формы и точных размеров объекта «как факт».** Основной приоритет получают такие параметры, как скорость проведения работ по лазерному сканированию, низкая стоимость выполнения работ и оборудования, универсальность и простота использования оборудования при обеспечении достаточного уровня точности;

— **получение данных для определения отклонений и проведения последующих расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) особо ответственных объектов.** При этом подходе важно получить максимум информации о форме и размерах элементов объекта не только в характерных точках, но и также важно выявить возможное наличие локальных отклонений по исследуемым поверхностям. Основным приоритетным преимуществом уже становится максимальная точность выполнения лазерного сканирования исследуемого объекта с сохранением скорости проведения работ

Таблица 1. Минимальные требования к оборудованию (лазерным сканерам)
Table 1. Minimum requirements for equipment (laser scanners)

№ п/п	Наименование параметра, характеристики	Значение параметра, содержание характеристики			
1	2	3			
1	Диапазон работы	от 0,4 м до 120 м			
2	Разрешающая способность, не менее	1 мм на 10 м			
3	Среднее квадратическое отклонение (СКО) измерения расстояния	1 мм на 10 м	20 %	0,5 мм на 10 м	50 % 80 %
		2 мм на 25 м		1 мм на 25 м	
		3 мм на 50 м		2 мм на 50 м	
		10 мм на 100 м		5 мм на 100 м	
4	Предел допустимой основной средней квадратической погрешности (СКП) измерения углов	не более 14"			
5	Максимальная скорость сканирования	не менее 1 000 000 изм. в сек (1000 kHz)			
6	Поле зрения по вертикали / горизонтали	от 0° до 270° / от 0° до 360°			
7	Рабочая температура, °С	от минус 20 до плюс 45			
8	Пыле- и влагозащищенность	не ниже IP53 по ГОСТ 14254-2015			

Таблица 2. Технические характеристики рассмотренных сканеров Leica, Trimble, Faro
Table 2. Technical characteristics of the reviewed scanners Leica, Trimble, Faro

	Лазерный сканер	Диапазон работы, м	Разрешающая способность	СКО измерения расстояния	Угловая точность, "	Максимальная скорость сканирования, kHz	Поле зрения по вертикали/горизонтали, °
1	Leica ScanStation P30/P40	0,4 – 120/0,4 – 270	0,8 мм на 10 м	Для 78 % 0,4 мм на 10 м 0,5 мм на 50 м	<8	1000	290/360
2	Leica ScanStation P50	0,4 – 270	0,8 мм на 10 м	Для 78 % 0,4 мм на 10 м 0,5 мм на 50 м	<8	1000	290/360
3	Trimble X9 Premium	0,6 – 150	3 мм на 10 м	Для 80% 1,5 мм на 30 м	<16	1000	282/360
4	Trimble X12	0,3 – 365	0,6 мм на 10 м	Для 80 % 0,2 мм на 10 м 0,25 мм на 25м 0,3 мм на 50 м 0,7 мм на 100 м	<14,4	2187	320/360
5	FARO FOCUS S150 PLUS	0,6 – 150	1,6 мм на 10 м	Для 90 % 0,1 мм на 10 м 0,2 мм на 25 м	<19	2000	300/360
6	FARO FOCUS X130	0,6 – 130	1,6 мм на 10 м	Для 90 % 0,3 мм на 10 м 0,3 мм на 25 м	<15	976	300/360
7	TOPCON GLS-2000	до 210	1 мм на 20 м	Для 90 % 2,0 мм на 150 м	<6	120	270/360
8	Z+F IMAGER 5016	0,3 – 365	1 мм на 10 м	Для 80 % 0,2 мм на 10 м 0,25 мм на 25м 0,3 мм на 50 м 0,7 мм на 100 м	<14,4	1100	320/360

по лазерному сканированию на достаточно высоком уровне.

Среди существующей отечественной нормативно-технической документации по лазерному сканированию наиболее полно и подробно требования к проведению лазерного сканирования с последующим расчетом НДС приведены в действующем руководящем документе ПАО «Транснефть» РД-23.020.00-КТН-099-19. Указанные в данном руководящем документе требования к оборудованию для наземного лазерного сканирования, применяемому на объектах ПАО «Транснефть» (табл. 1), являются достаточно высокими в части требуемой точности измерения, поэтому им полностью соответствует лишь малая часть выпускаемых сканеров. Рассмотрим эту проблему на примере актуальных лазерных сканеров от пяти наиболее популярных производителей (Leica Geosystems [9], Trimble Inc. [10], FARO [11], TOPCON [12], Z+F [13]), сравнительный анализ основных технических характеристик которых приведен в табл. 2. К сожалению, в настоящее время отечественные производители не могут предложить массовые серийные панорамные ToF сканеры и программное обеспечение к ним, сопоставимое по своим возможностям с зарубежными образцами.

Точность выполнения лазерного сканирования исследуемого объекта, прежде всего, зависит от таких параметров, как разрешающая способность, средняя квадратическая ошибка (СКО) измерения расстояния, угловая точность сканирования. Такие параметры, как разрешающая способность и СКО измерения расстояния, определяются непосредственно точностью и скоростью работы исследуемого лазерного модуля. Угловая точность сканирования в значительной степени зависит

от применяемой в сканере системы привода и точности используемых угловых датчиков — энкодеров. Максимальная скорость сканирования зависит как от непосредственно максимально возможной скорости работы электропривода с требуемой угловой точностью, так и от максимальной скорости выполнения и обработки одного замера дальномерным лазерным модулем.

При проведении анализа было отмечено, что такая характеристика, как угловая точность, у многих современных сканеров на 3–35 % ниже, чем предъявляемые требования, что достаточно сильно снижает выбор подходящего оборудования для проведения наземного лазерного сканирования резервуаров в соответствии с нормативными документами.

Максимальная заявленная угловая точность среди рассмотренных лазерных сканеров достигнута в семействе лазерных сканеров Leica ScanStation P/30/40/50 (8") и в лазерном сканере TOPCON GLS-2000 (6"), однако у последнего заявленная скорость сканирования (120 kHz) значительно уступает другим современным сканерам (500–2000 kHz) и он по своей сути является промежуточным звеном между лазерными сканерами и сканирующими тахеометрами, для которых точность выполнения единичного измерения каждой конкретной точки является приоритетной, а возможность выполнять 3D-сканирование (преимущественно локального участка) является дополнительной.

3.4 Анализ конструкций приводов лазерных сканеров

Электропривод в лазерных сканерах является ключевым элементом, отвечающим за точное позиционирование лазерного луча в пространстве. Основными требованиями к электроприводу являются

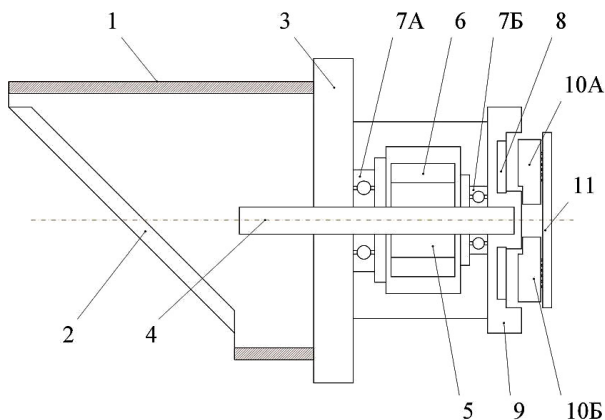


Рис. 2. Конструкция привода отклоняющего устройства сканера FARO: 1 — держатель; 2 — отклоняющее зеркало; 3 — кольцевой диск; 4 — вал; 5 — ротор электродвигателя; 6 — статор электродвигателя; 7А, 7Б — пары подшипников; 8 — энкодер; 9 — корпус; 10А, 10Б — считывающие головки; 11 — печатная плата управления

Fig. 2. Design of the FARO scanner deflection drive:
 1 — holder; 2 — deflecting mirror; 3 — annular disk;
 4 — shaft; 5 — electric motor rotor;
 6 — electric motor stator; 7А, 7Б — bearing pairs;
 8 — encoder; 9 — upper structure; 10А, 10Б — reading heads;
 11 — control printed circuit board

его управляемость, устойчивость к внешним воздействиям и способность максимально стабильно поддерживать заданную скорость вращения.

Параметры угловой точности оборудования НЛС напрямую зависят от точности энкодеров, используемых в конструкции привода, и общей прецизионной точности изготовления, сборки и балансировки системы электропривода — отклоняющее устройство (лазерный сканирующий модуль). При этом также важно отметить, что с повышением точности и уменьшением допусков значительно повышается себестоимость узла и повышается вероятность получения в ходе эксплуатации повреждений, способных снизить точность оборудования ниже заявленной. Поскольку рассматриваемый сценарий использования оборудования НЛС в строительной отрасли не предполагает создания условий, которые бы в полной мере исключили или минимизировали вероятность получения оборудованием повреждений, вопросы снижения уязвимости оборудования являются одними из важнейших.

На основе актуального патента компании FARO [14] показан пример классической конструкции привода отклоняющего устройства на основе жесткой (прямой) связи между валом электродвигателя и приводимым с его помощью валом с установленным оборудованием (рис. 2). Основным преимуществом подобной конструкции является её компактность, однако такая конструкция привода является в целом менее точной ввиду прямой передачи вибраций, резонансов и отсутствия дублирования информации об углах поворота другим энкодером и, как следствие, она более склонна к снижению точности в процессе эксплуатации ввиду подверженности различным механическим повреждениям в результате случайного воздействия на вращающиеся элементы ввиду их жесткой (либо прямой) связи с электродвигателем.

При проведении анализа актуальных патентов компании Leica Geosystems, касающихся конструкций сервоприводов, которые применяются либо планируются к применению в 3D лазерных сканерах

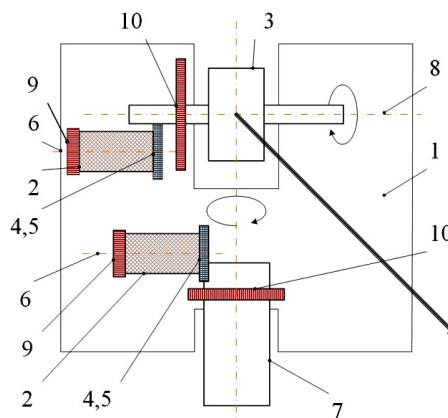


Рис. 3. Принципиальная конфигурация электроприводов геодезического прибора Leica Geosystems: 1 — корпус сканера; 2 — электродвигатель; 3 — отклоняющий элемент; 4 — редуктор; 5 — фрикционная муфта; 6 — вал электродвигателя; 7 — вал прибора; 8 — вал отклоняющего устройства; 9 — энкодер двигателя; 10 — энкодер прибора

Fig. 3. Basic configuration of electric drives of the Leica Geosystems geodetic instrument:
 1 — scanner body; 2 — electric motor;
 3 — deflection element; 4 — reducer gearbox;
 5 — friction clutch; 6 — electric motor shaft;
 7 — device shaft; 8 — deflection device shaft;
 9 — motor encoder; 10 — instrument encoder

Leica, был отмечен свой оригинальный подход компании к конструированию схемы привода рабочего оборудования.

На основе актуального патента [15] показана принципиальная конфигурация электроприводов геодезического прибора Leica Geosystems, согласно которой предусмотрено отсутствие жесткой (прямой) связи между валом электродвигателя и приводимым с его помощью валом с установленным оборудованием (рис. 3) и контур управления таким электроприводом (рис. 4). С целью точного определения углового положения в данной конструкции электропривода предусмотрено применение системы из двух энкодеров: расположенного на валу электродвигателя энкодера двигателя и расположенного непосредственно на валу с оборудованием энкодера прибора.

Хотя применение в конструкции фрикционной муфты и повлекло за собой необходимость применения двух энкодеров, оно обеспечило более плавное и точное движение и позволило избежать рывков, резонансов, которые могут повредить точности измерения прибора. Использование двух энкодеров также позволило более быстро, но и при этом с большей точностью осуществлять управляемое изменение скорости вращения с его последующим точным поддержанием за счет оперативной реакции на изменение показаний энкодера двигателя и последующим более точным определением действительных параметров вращения с помощью энкодера, установленного на валу устройства, показания которого также используются как действительные показатели углового положения для построения облака точек.

Отсутствие жесткой связи между валом устройства и электродвигателем позволяет путем сравнения показаний двух энкодеров оперативно выявить начало проскальзывания во фрикционной передаче, возникающее из-за превышения момента электро-

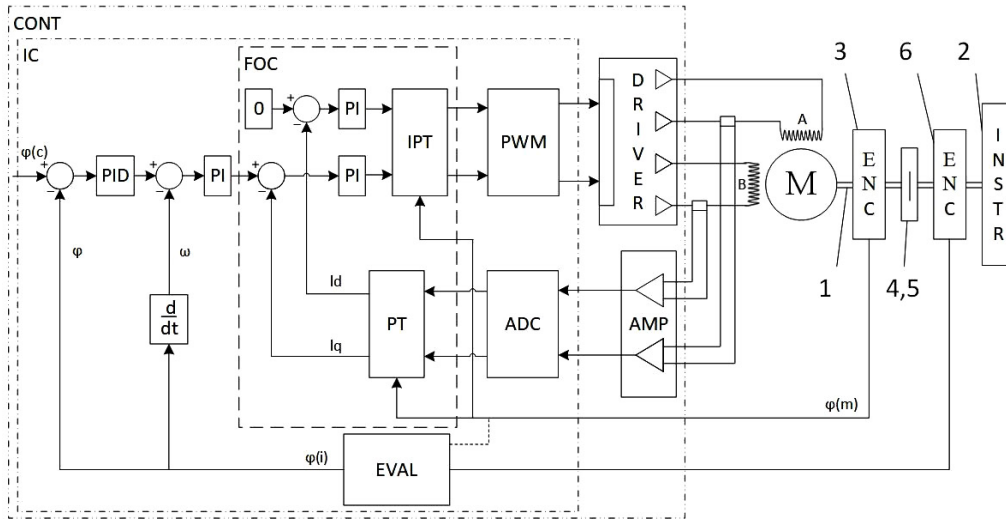


Рис. 4. Контур управления электроприводом прибора Leica Geosystems:
 1 — вал электродвигателя; 2 — вал инструмента; 3 — энкодер двигателя; 4 — редуктор;
 5 — фрикционная муфта; 6 — энкодер прибора

Fig. 4. Control circuit of the electric drive of the Leica Geosystems device:
 1 — electric motor shaft; 2 — instrument shaft; 3 — motor encoder; 4 — gearbox;
 5 — friction clutch; 6 — instrument encoder

двигателя при разгоне и/или внешнем воздействии на вращение устройства, что позволяет избежать поломки устройства в результате ударной нагрузки и возросшего крутящего момента из-за действия внешних сил, приложенных к вращающимся элементам конструкции.

С целью снижения стоимости, повышения надёжности и быстродействия рассмотрим возможность модернизации приведенной перспективной конструкции электропривода лазерного сканера Leica Geosystems [15] при помощи применения в её схеме управления принципов фазовой автоподстройки частоты вращения.

3.5 Электроприводы с высокими показателями динамической производительности, основанные на принципах ФАПЧВ

Пришедшие из радиоэлектроники принципы фазовой автоподстройки частоты уже нашли широкое применение в системах управления приводов для эффективного решения задач, связанных с высокочастотными и высокоточными перемещениями/отклонениями. Согласно проведенным исследованиям [16, 17], применение принципов ФАПЧ в системах управления быстрым отклонением зеркала позволяет на 60 % снизить результирующую среднеквадратичную ошибку отслеживания траектории движения лазера по фигуре Лиссажу с опорной частотой 473 Гц по сравнению с традиционными методами при осуществлении сканирования триангуляционным 3D-сканером.

Применение принципов ФАПЧ для решения задач, связанных с меньшими опорными частотами, таких, например, как управление моторным электроприводом, осуществляющим вращение с высокими показателями динамической производительности, ранее уже рассматривалось в научных работах. Был проведен динамический анализ электропривода с цифровым регулятором, построенном на принципах ФАПЧВ и показана его эффективность для построения фазированного электропривода, способного работать, в том числе и в области низких частот вращения вала [18]. Для проведения исследований была разработана компьютерная модель синхрон-

но-синфазного электропривода, позволяющая с высокой точностью моделировать процессы синхронизации электропривода при различных способах регулирования [19]. Предложен способ квазиоптимального по времени управления электроприводом на основе ФАПЧВ, позволяющий улучшить динамические характеристики электропривода в переходных режимах синхронизации [20]. В рамках исследований было доказано, что системы управления, построенные на основе принципов ФАПЧВ, благодаря своей конструктивной простоте, надёжности, быстродействию и точности работы на больших частотах вращения, могут значительно повысить эффективность электроприводов, построенных на их основе.

В качестве примера для определения расчетных скоростей работы электропривода примем рабочую скорость вращения оборудования при выполнении сканирования на основе технических характеристик сканера Leica ScanStation P30. Так, при выполнении сканирования с максимальным разрешением 0,8 мм на 10 м скорость вращения вокруг горизонтальной оси составляет ориентировочно 745 об/мин и, в зависимости от выставных параметров скорости сканирования и разрешения, может изменяться до 3000 об/мин при работе от аккумулятора и до 6000 об/мин — при работе от внешнего источника питания. Максимальная же скорость вращения оборудования вокруг вертикальной оси достигается при наименьшем разрешении сканирования (50 мм на 10 м) и составляет 6,1 об/мин. Из этого можно сделать вывод, что рассмотренные в работах [18–20] принципы построения систем управления электроприводом с фазовой синхронизацией на основе принципов ФАПЧВ, предназначенные, в том числе, для работы на низких частотах вращения, в полной мере применимы для построения эффективной системы управления электроприводом лазерного сканера, работающего на оптимальных частотах вращения, и позволяющей при необходимости значительно увеличить частоты вращения без снижения точности управления.

Основными преимуществами электроприводов на основе принципов ФАПЧВ для их эффективного

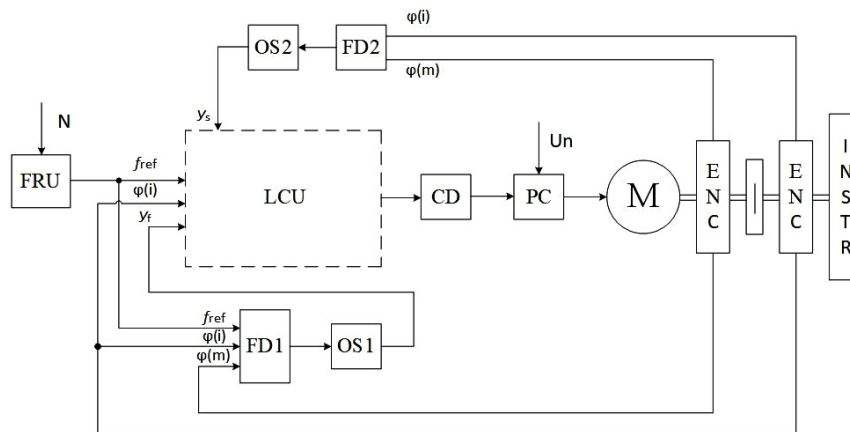


Рис. 5. Контур управления электроприводом с использованием ФАПЧВ
 Fig. 5. Electric drive control loop using PLL

применения в конструкции лазерных 3D-сканеров являются:

- идеальный астатизм по скорости, позволяющий достичь максимально высокой точности построения облака точек и обеспечить точное фиксирование их положения в ортогональной системе координат;

- упрощенная схемотехника и элементная база по сравнению с существующими системами управления, обеспечивающая при этом сопоставимую точность и скорость работы электропривода, что позволяет снизить общую стоимость лазерного сканера при сохранении его параметров;

- синхронизация частоты вращения электропривода с заданной опорной частотой, которая привязана к числу импульсов обратной связи с энкодера и не зависит от времени их получения, как следствие повышение частоты вращения не будет оказывать негативное влияние на точность работы системы управления приводом. Это позволит повысить скорости лазерного сканирования без снижения точности и необходимости дополнительных доработок системы управления приводом.

Для подтверждения возможности применения электропривода с системой управления основанной на принципах ФАПЧВ в конструкции лазерного 3D-сканера в среде динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем MATLAB/Simulink был смоделирован предварительный проект схемы электропривода лазерного сканера, выполненный на основе контура управления приводом для принципиальной конфигурации электроприводов геодезического прибора Leica Geosystems [15] с заменой элементов контура управления на элементы цифрового регулятора построенного на принципах ФАПЧВ.

На рис. 5 представлен рассмотренный пример возможной реализации схемы привода сканирующего устройства, основанной на модернизации с использованием принципов ФАПЧВ. Контур управления электроприводом глобально включает в себя блок логического сравнения (LCU) и два контура с частотными дискриминаторами (FD). Основной контур (FD1) отвечает за переключение режимов управления приводом, сравнивая импульсы $\phi(i)$, поступающие с энкодера на валу устройства с импульсами опорной частоты f_{ref} . Вспомогательный контур (FD2) контролирует работу фрикционной муфты, сравнивая импульсы $\phi(i)$ и $\phi(m)$, поступающие с каждого из энкодеров.

Выводы

Развитие вычислительной техники и последующая цифровизация производственных процессов затронули, в том числе, отрасли, непосредственно связанные с проектированием и строительством различных объектов.

Для эффективного использования возможностей САПР требуется как наличие точных и подробных исходных данных о местности, окружающей объект проектирования, так и своевременное получение актуальных данных оперативного контроля промежуточных результатов выполняемого строительства. Наиболее эффективным средством оперативного получения этих данных является НАС. Применение НАС в области строительства накладывает определенные требования к оборудованию, используемому в условиях строительного объекта.

Одним из перспективных направлений развития лазерных сканеров является разработка надежных электроприводов, которые бы обеспечивали контролируемую и повторяемую работу устройств, предохраняя элементы оборудования от вероятных повреждений в условиях строительного объекта. Рассмотренный принцип управления электроприводом лазерного сканера с использованием ФАПЧВ после его дальнейшей проработки позволит снизить стоимость системы управления, сохранив или улучшив её динамические характеристики и точность работы по сравнению с существующими системами.

Применение в электроприводе фрикционной муфты с двумя энкодерами в случае нештатной работы обеспечит оперативное торможение привода при выявлении проскальзывания фрикционной муфты, что повысит общую надежность конструкции в сложных условиях эксплуатации.

Использование в лазерных сканерах электроприводов с системой управления, построенной на основе принципов ФАПЧВ, обеспечит высокую точность и скорость сканирования при меньших требованиях к процессорной и элементной базе системы управления по сравнению с существующими решениями. Снижение себестоимости системы управления с возможностью дальнейшего улучшения технических характеристик систем сканирования, в свою очередь, будет способствовать более широкому применению НАС в строительстве и других областях для повышения качества контроля выполняемых работ.

1. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: Изд-во СГГА, 2009. 261 с.
2. Seredovich V. A., Komissarov A. V., Komissarov D. V., Shirokova T. A. Nazemnoye lazernoye skanirvaniye [Terrestrial laser scanning]. Novosibirsk, 2009. 261 p. (In Russ.).
3. Хахулина Н. Б., Нестеренко И. В. Возможности технологий лазерного сканирования для получения геопространственных данных // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2018. № 1 (6). С. 141–149. EDN: VLYHYA.
4. Khakhulina N. B., Nesterenko I. V. Vozmozhnosti tekhnologiy lazernogo skanirvaniya dlya polucheniya geoprostranstvennykh dannykh [Possibilities of laser scanning technologies for obtaining geophysical data]. Modeli i tekhnologii prirodobustroystva (regional'nyy aspekt). *Models and Technologies Environmental Engineering (Regional Aspect)*. 2018. No. 1 (6). P. 141–149. EDN: VLYHYA. (In Russ.).
5. Вареник К. А., Вареник А. С., Храмов Д. Д., Чамеев А. С. Создание цифровой информационной модели Георгиевского собора Юрьева монастыря на основе результатов лазерного сканирования и фотограмметрии // Перспективы науки. 2023. № 4 (163). С. 80–86. EDN: AIMLVR.
6. Varenik K. A., Varenik A. S., Khramov D. D., Chameyev A. S. Sozdaniye tsifrovoy informatsionnoy modeli Georgiyevskogo sobora Yur'yeva monastyrya na osnove rezul'tatov lazernogo skanirvaniya i fotogrammetrii [Creation of digital models of St. George's cathedral of the Yuryev monastery using the results of laser scanning and photogrammetry]. *Perspektivy nauki. Science Prospects*. 2023. No. 4 (163). P. 80–86. EDN: AIMLVR. (In Russ.).
7. Самарина А. А. Сравнительная оценка результатов наземного лазерного сканирования с данными традиционного обследования на примере объекта историко-культурного наследия Доходный дом М. М. Барановой в г. Перми // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 537–541. EDN: ZWVZPP.
8. Shamarina A. A. Sravnitel'naya otsenka rezul'tatov nazemnogo lazernogo skanirvaniya s dannymi traditsionnogo obsledovaniya na primere ob'yekta istoriko-kul'turnogo naslediya Dokhodnyy dom M. M. Baranovoy v g. Permi [Comparative assessment of ground laser scanning results with traditional survey data on the example of a historical and cultural heritage object M. M. Baranova apartment house in Perm]. *Innovatsii i investitsii. Innovation and Investment*. 2023. No. 5. P. 537–541. EDN: ZWVZPP. (In Russ.).
9. Шарафутдинова А. А., Брын М. Я. Опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26, № 1. С. 57–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67. EDN: UONPQL.
10. Sharafutdinova A. A., Bryn M. Ya. Opyt primeneniya nazemnogo lazernogo skanirvaniya i informatsionnogo modelirovaniya dlya upravleniya inzhenernymi dannymi v techeniye zhiznennogo tsikla promyshlennogo ob'yekta [The experience in using laser scanning and building information modeling for engineering data management during the life cycle of an industrial object]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2021. Vol. 26, no. 1. P. 57–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67. EDN: UONPQL. (In Russ.).
11. Комиссаров А. В., Ремизов А. В. Методика использования BIM-технологий и лазерного сканирования для реконструкции и модернизации объектов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2022. Т. 27, № 2. С. 115–124. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-115-124. EDN: NHUFEV.
12. Komissarov A. V., Remizov A. V. Metodika ispol'zovaniya BIM-tekhnologiy i lazernogo skanirvaniya dlya rekonstruktsii i modernizatsii ob'yektov [Application bim-technologies and laser scanning for reconstruction and modernization of objects]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2022. Vol. 27, no. 2. P. 115–124. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-115-124. EDN: NHUFEV. (In Russ.).
13. Богданов А. Н., Листратов Я. А. Строительный контроль методом наземного лазерного сканирования // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 401–409. EDN: BRIRDS.
14. Bogdanov A. N., Listratov Ya. A. Stroitel'nyy kontrol' metodom nazemnogo lazernogo skanirvaniya [Construction control by ground laser scanning]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019. No. 4 (50). P. 401–409. EDN: BRIRDS. (In Russ.).
15. Могучев С. Б. Строительный контроль с использованием облака точек и информационной модели здания // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 580–589. EDN: AORUME.
16. Moguchev S. B. Stroitel'nyy kontrol' s ispol'zovaniyem oblaka tochek i informatsionnoy modeli zdaniya [Building control using point cloud and building information model]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2022. No. 6 (90). P. 580–589. EDN: AORUME. (In Russ.).
17. 3D laser scanning Leica. *Leica Geosystems*. URL: <https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/scanners> (accessed: 02.03.2025).
18. Terrestrial 3D laser scanning and imaging systems. *Trimble Inc*. URL: <https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/laser-scanning> (accessed: 02.03.2025).
19. FARO Focus Laser Scanning Solution. *FARO*. URL: <https://www.faro.com/en/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners> (accessed: 02.03.2025).
20. Laser Scanners TOPCON. *Topcon Corp*. URL: <https://mytopcon.topconpositioning.com/na/support/products/5255> (accessed: 02.03.2025).
21. Terrestrial 3D laser scanner Z+F. *Zoller + Fröhlich GmbH*. URL: <https://www.zofre.de/en/laser-scanners/3d-laser-scanner> (accessed: 02.03.2025).
22. Kramer A., Ossig M., Becker R. Method of obtaining a reference correction value for an index mark of an angular encoder. US Patent 9,759,583; filed April 29th, 2015; published September 12th, 2017.
23. Müller B., Schmitt T. L., Herbst C., Wachter H. M. Drive system in a geodetic measurement instrument. US Patent 2021/0055104; filed August 20th, 2020; published February 25th, 2021.
24. Csencsics E., Schitter G. Design of a phase-locked-loop-based control scheme for Lissajous-trajectory scanning of fast steering mirrors. *2017 American Control Conf. (ACC)*. 2017. P. 1568–1573. DOI: 10.23919/ACC.2017.7963176.
25. Csencsics E., Ito S., Schlarp J., Schitter G. System Integration and Control for 3D Scanning Laser Metrology. *IEEE Journal of Industry Applications*. DOI: 10.1541/ieejia.8.207. Vol. 8 (2). P. 207–217.
26. Bubnov A., Daynovich A. Digital automatic control system of phase-lock motor drive. *2017 Dynamics of Systems, Mechanics and Control Processes*. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239439
27. Bubnov A. V., Chudinov A. N., Chetverik A. N., Shpineva V. I. Development and Investigation of a Computer Model of a Synchronous-in-phase Electric Drive. *2018 Dynamics of Systems, Mechanics and Machines (Dynamics)*. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601446. EDN: WTXZPX.
28. Bubnov A. V., Chetverik A. N., Chudinov A. N., Schekochikhin A. V. Development of Control Methods of Phase-

locked Electric Drive with Improved Dynamic Performance. 2019 *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944729.

ТУРЫБРИН Артем Юрьевич, аспирант кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; ведущий инженер ООО «Транснефть Надзор» ОП «Омское УСК», г. Омск.

SPIN-код: 9258-9815

AuthorID (РИНЦ): 1234858

ORCID: 0009-0008-7287-4811

ResearcherID: KBC-9069-2024

Адрес для переписки: art-turibrin@mail.ru

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5358-0661

AuthorID (РИНЦ): 250020

ORCID: 0000-0002-0604-3795

ResearcherID: A-6669-2015

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2930-8935

AuthorID (РИНЦ): 688459

ORCID: 0000-0001-8470-9823

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: O-4913-2017

Адрес для переписки: anchetverik@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 03.04.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.

TURYBRIN Artem Yuryevich, Postgraduate at the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk; Leading Engineer of LLC "Transneft Nadzor" Omsk Separate division, Omsk.

SPIN-code: 9258-9815

AuthorID (RSCI): 1234858

ORCID: 0009-0008-7287-4811

ResearcherID: KBC-9069-2024

Correspondence address: art-turibrin@mail.ru

BUBNOV Aleksey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5358-0661

AuthorID (RSCI): 250020

ORCID: 0000-0002-0604-3795

ResearcherID: A-6669-2015

Correspondence address: bubnov-av@bk.ru

CHETVERIK Alina Nailevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2930-8935

AuthorID (RSCI): 688459

ORCID: 0000-0001-8470-9823

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: O-4913-2017

Correspondence address: anchetverik@omgtu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 03.04.2025; approved after reviewing 29.05.2025; accepted for publication 25.06.2025.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТИВНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Е. В. Егоров, Д. Д. Боровых

Омский государственный технический университет, г. Омск

Целью статьи является исследование работы оперативно-измерительного комплекса на базе бесконтактных измерителей тока и напряжения для обеспечения мониторинга параметров режимов работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Проведено имитационное моделирование работы электродвигателя и получены расчетные параметры режимов. Экспериментально исследованы различные режимы работы двигателя с использованием лабораторного стенда. Проанализированы полученные оперативно-измерительным комплексом экспериментальные результаты, а также сопоставлены с результатами расчета и эталонными данными. На основании проведенного анализа сделано заключение о корректности работы комплекса в отношении мониторинга параметров электрических режимов.

Ключевые слова: оперативно-измерительный комплекс, бесконтактный датчик, режимы работы, короткое замыкание, электродвигатель, цифровизация, электротехническая система.

Для цитирования: Егоров Е. В., Боровых Д. Д. Применение оперативно-измерительного комплекса для контроля режимов работы асинхронного электродвигателя в электротехнической системе // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 95–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-95-102. EDN: OOFNBU.



© Егоров Е. В., Боровых Д. Д., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF AN OPERATIONAL MEASURING COMPLEX FOR MONITORING THE OPERATING MODE OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH A CLOSED-LOOP ROTOR

E. V. Egorov, D. D. Borovykh

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

This article examines the operation of an operational measuring complex based on contactless current and voltage meters to monitor the operating parameters of an asynchronous electric motor with a closed-loop rotor. A simulation of the operation of an electric motor has been carried out and the calculated parameters of the mode have been obtained under the conditions of the electrical connection scheme under consideration. Various modes of engine operation are implemented using a laboratory stand during the experiment. The experimental results obtained by the operational measurement complex are analyzed, as well as compared with the calculation results and reference data.

Based on the analysis, a conclusion is made about the correctness of the complex's operation in relation to monitoring the parameters of electrical modes.

Keywords: operational and measuring complex, contactless sensor, operating modes, short circuit, electric motor, digitalization, electrical system.

For citation: Egorov E. V., Borovykh D. D. Application of an operational measuring complex for monitoring the operating mode of an asynchronous electric motor with a closed-loop rotor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 95–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-95-102. EDN: OOFNBU.



© Egorov E. V., Borovykh D. D., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

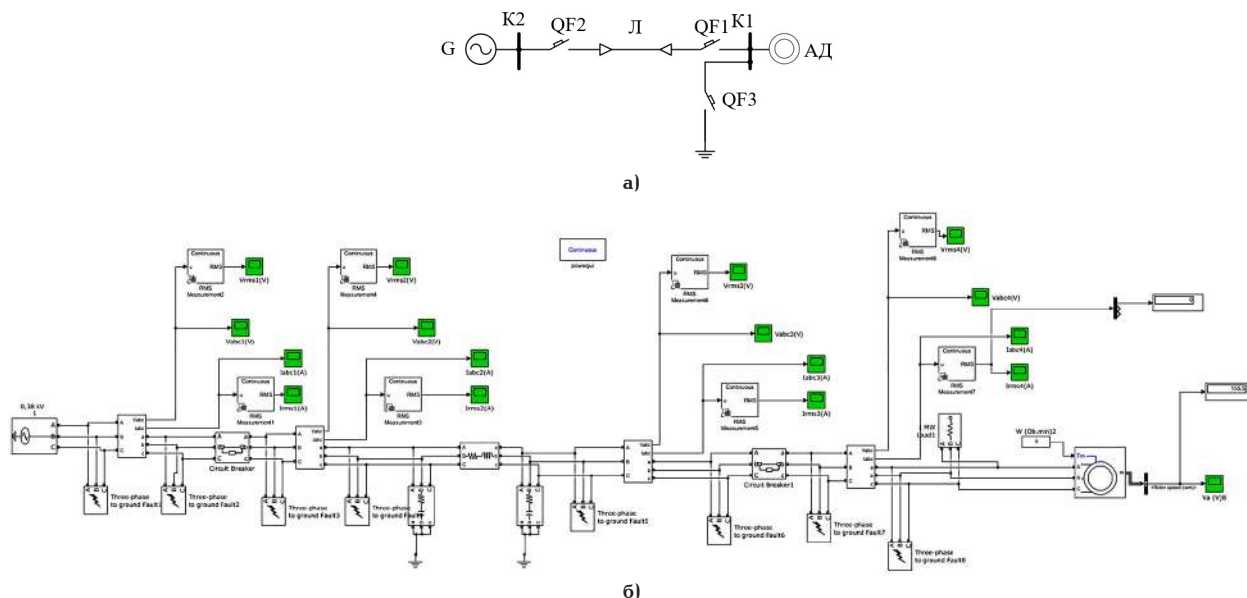


Рис. 1. Схема питания асинхронного двигателя: а — однолинейная схема; б — имитационная модель
 Fig. 1. Asynchronous motor power supply circuit: a — single-line circuit; б — simulation model

Введение

За последнее время значительно увеличился уровень внедрения цифровых решений в области электроэнергетики. Всё более актуальной становится задача полной цифровизации устройств релейной защиты и автоматики, а именно переход от использования измерительных трансформаторов тока и напряжения к использованию микропроцессорных (интеллектуальных) измерителей и датчиков. В данной работе рассматривается использование бесконтактных измерителей тока и напряжения в качестве средств мониторинга параметров электроэнергетического режима при реализации оперативно-измерительного комплекса (ОИК) для защиты электродвигателя.

Переход к цифровым устройствам контроля и измерения электрических параметров приобретает всё большую актуальность, что обусловлено внедрением новых решений и технологий: Smart Grid, цифровых подстанций, стандарта МЭК 61850 и т. д.

Этому переходу также способствует уменьшение стоимости подобных измерителей вследствие развития и многообразия элементной базы, упрощения процесса монтажа таких устройств, уменьшения их габаритных показателей.

Подтверждением вышеизложенного могут послужить публикации научного сообщества в рамках данного направления в разных странах. В России среди них можно отметить: предложение о реализации интеллектуальной релейной защиты с использованием набора датчиков физических величин внешних факторов, обзор на тему перехода основных производителей устройств релейной защиты от традиционных измерительных трансформаторов тока и напряжения к цифровым измерителям и датчикам, исследования, посвященные применению катушки Роговского в качестве основного средства измерения для токовых защит [1–3].

За рубежом данная тематика тоже не осталась без внимания. Проводятся исследования в области применения цифровых датчиков в качестве средства реализации повсеместных цифровых электрических сетей, реализации бесконтактных датчиков

тока на основе TMR-матрицы, а также применения бесконтактных датчиков тока для мониторинга, защиты и управления системами электроснабжения [4–6]. Более того, предлагается метод бесконтактного измерения напряжения для нужд электроэнергетики и применение таких измерителей в распределительных сетях [7–8].

Авторами настоящей работы разработан и исследован датчик для бесконтактного измерения напряжения и тока [9]. Указанное устройство сочетает в себе два измерителя. В данной работе рассмотрено применение трехфазного оперативно-измерительного комплекса на основе бесконтактных измерителей напряжения и тока для контроля за режимом работы электродвигателя.

I. Моделирование

Проведено моделирование электроэнергетических режимов согласно представленным на рис. 1 схемам при различных условиях [10].

За основной принят режим работы электродвигателя на холостом ходу.

Источником питания является шина номинальным напряжением 0,4 кВ.

Спротивлением источника питания в данной модели решено пренебречь.

Линия электропередачи представлена в виде резистивного элемента со сосредоточенными параметрами. Активное сопротивление линии составляет 208 Ом с индуктивностью 0,3 Гн. Приемником электрической энергии, а также и объектом мониторинга, является лабораторный маломощный асинхронный двигатель АИР56А4У2, номинальный ток которого равен 0,443 А.

В рамках исследования произведено моделирование работы двигателя на холостом ходу, а также смоделированы режимы однофазного (K^1), двухфазного (K^2), двухфазного на землю (K^{1-1}) и трехфазного коротких замыканий (K^3). Точкой короткого замыкания является $K1$ (рис. 1а). Таким образом, имитируется аварийный режим на зажимах электродвигателя.

Описание моделирования. В начальный момент времени происходит пуск электродвигателя. Пуско-

Таблица 1. Значения токов при различных видах коротких замыканий
Table 1. Current values for various types of short-circuits

Вид КЗ	Действующее значение тока фазы А, А		Действующее значение тока фазы В, А		Действующее значение тока фазы С, А	
	В момент КЗ	В момент УКЗ	В момент КЗ	В момент УКЗ	В момент КЗ	В момент УКЗ
Однофазное КЗ	0,968	0,960	0,134	0,23	0,302	0,294
Двухфазное КЗ	0,81	0,7483	0,953	0,945	0,228	0,368
Двухфазное КЗ на землю	0,965	0,960	1,047	0,960	0,150	0,273
Трёхфазное КЗ	0,968	0,960	1,05	0,960	0,99	0,960

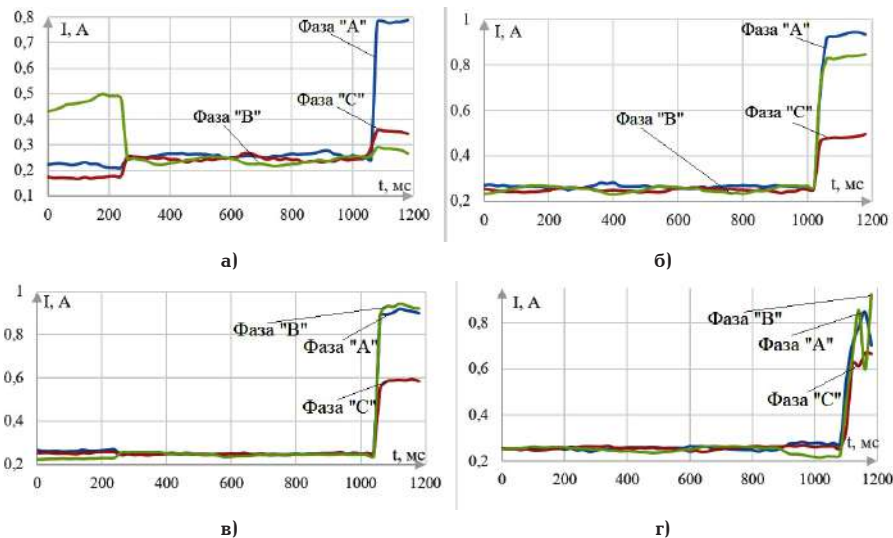


Рис. 2. Осциллограммы действующих значений токов коротких замыканий, измеренных комплексом: а — при однофазном КЗ; б — при двухфазном КЗ; в — при двухфазном КЗ на землю; г — при трехфазном КЗ
Fig. 2. Waveforms of the effective values of short-circuit currents measured by the complex: а — for single-phase short-circuit; б — for two-phase short-circuit; в — for two-phase short-circuit to ground; г — for three-phase short-circuit

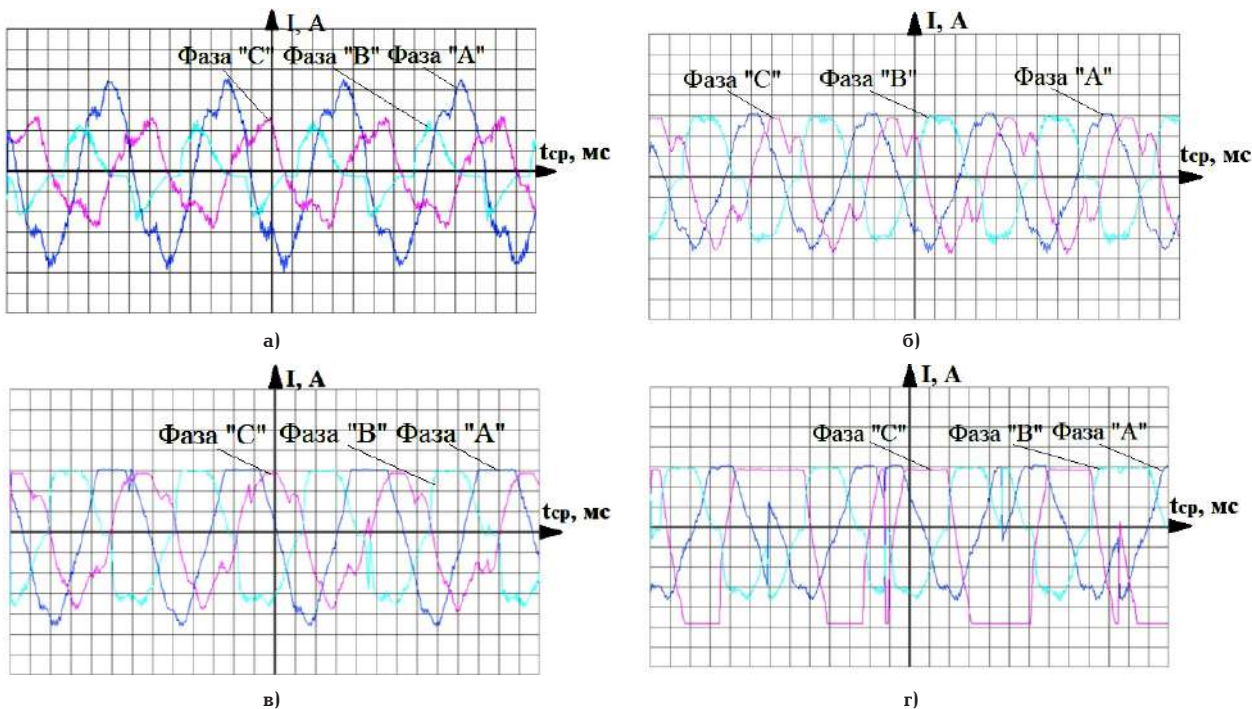


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений токов УКЗ, измеренных комплексом: а — при однофазном КЗ; б — при двухфазном КЗ; в — при двухфазном КЗ на землю; г — при трехфазном КЗ
Fig. 3. Oscillograms of the instantaneous values of the DC currents measured by the complex: а — with a single-phase short-circuit; б — with a two-phase short-circuit; в — with a two-phase short-circuit to ground; г — with a three-phase short-circuit

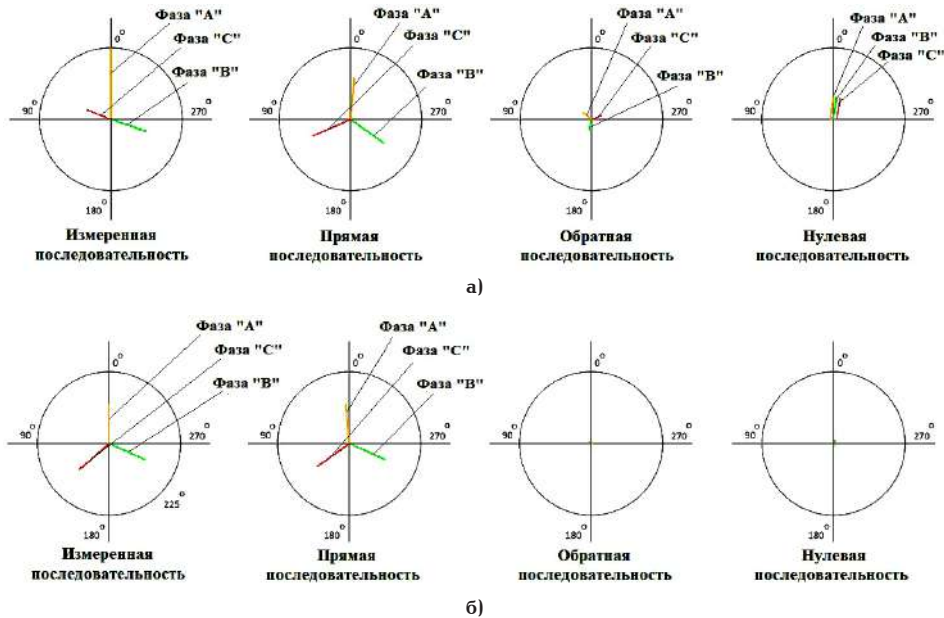


Рис. 4. Векторные диаграммы токов при работе двигателя в различных режимах, полученных комплексом: а — однофазного КЗ; б — холостого хода
 Fig. 4. Vector diagrams of currents during engine operation in various modes obtained by the complex: a — single-phase short-circuit; б — idle mode



Рис. 5. Спектрограммы токов фазы С при работе АД в режиме двухфазного КЗ на землю, полученных комплексом: а — до возникновения аварийного режима; б — после возникновения аварийного режима
 Fig. 5. Spectrograms of phase C currents during operation of BP in the two-phase short-circuit to earth mode, obtained by the complex: a — before the occurrence of the emergency mode; б — after the occurrence of the emergency mode

вой ток двигателя достигает около 0,47 А. В режиме холостого хода машины её ток равен 0,22 А, а фазное напряжение — 191,43 В.

Такое большое падение напряжения объясняется значительным активным и индуктивным сопротивлением линии. Такие параметры схемы выбраны целенаправленно, чтобы избежать больших токов короткого замыкания (КЗ) при реализации эксперимента на стенде. На третьей секунде имитационного процесса моделируется короткое замыкание на зажимах обмоток электродвигателя (точка К1) с помощью выключателя QF3. Значения параметров режима установившегося короткого замыкания соответствуют моментам времени, когда установившееся КЗ (далее УКЗ) зафиксировано окончательно. Продолжительность короткого замыкания во всех случаях имитаций составляет 1 секунду. На четвертой секунде отключается выключатель QF1.

Данный алгоритм моделирования соответствует всем представленным в работе видам короткого замыкания. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Полученные при моделировании данные приняты в качестве расчетных значений. Далее данные эксперимента будут сопоставляться с расчетными и эталонными.

II. Экспериментальная часть

Как было сказано ранее, рассматривается режим работы электродвигателя на холостом ходу, а также его аварийные режимы.

Описание эксперимента. Схема электрических соединений при осуществлении эксперимента соответствует приведенной выше (рис. 1а). В режиме холостого хода значение фазного напряжения, измеренного лабораторным мультиметром в точке К2, изменяется в диапазоне 186 — 189 В.

Линия электропередачи реализована в виде блока резистивно-индуктивных элементов. С помощью автоматического выключателя QF3 осуществляются короткие замыкания. Бесконтактные измерители тока и напряжения в количестве трех экземпляров по одному на каждую фазу расположены в точке К2. При этом замыкания производятся в точке К1. Из-за достаточно высокого сопротивления линии

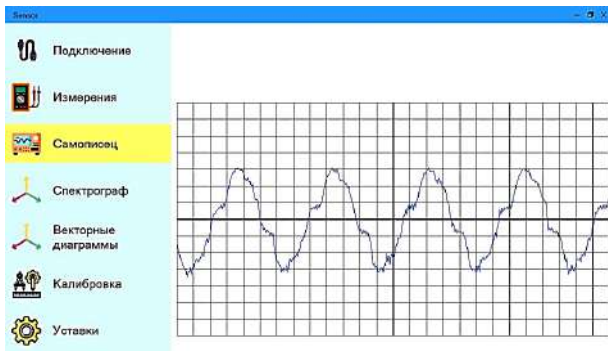


Рис. 6. Осциллограмма тока фазы С при работе АД в режиме холостого хода (масштаб тока $m_i = 0,11$ А/кА)
 Fig. 6. Oscilloscope of the phase C current when the BP is operating in idle mode (current scale $m_i = 0.11$ A/k)

ток КЗ не превышал 1,7 А во всех производимых экспериментах. Значения, полученные с помощью лабораторных мультиметров, приняты в качестве эталонных.

Для повышения достоверности получаемых данных каждый вид короткого замыкания производится несколько раз. Полученные при экспериментах осциллограммы приведены на рис. 2.

Форма кривой, полученная при измерении мгновенных значений токов в режиме УКЗ с помощью ОИК, представлена на рис. 3.

Также комплекс имеет возможность записи векторных диаграмм (рис. 4) и фиксации гармонических составляющих тока и напряжения каждой фазы (рис. 5). Возможность визуализации векторных диаграмм (ВД) и амплитуды гармонических составляющих реализована непосредственно в программном обеспечении данного ОИК.

Осциллограмма мгновенных значений тока в фазе С приведена на рис. 6.

III. Анализ результата

При сопоставлении результатов используется три источника данных. Данные результаты сведены в таблицу сопоставления (табл. 2).

Первый источник — полученные расчетные значения при реализации имитационного моделирования; второй — полученные оперативно-измеритель-

ным комплексом величины; третий — измеренные эталонные значения с помощью лабораторных мультиметров (эталон).

Проведем общую оценку полученных результатов.

Оценка режима при работе асинхронного двигателя (АД) на холостом ходу (нормальный режим): режим холостого хода в работе принят за нормальный с целью безопасного проведения экспериментов. На основании приведенной осциллограммы холостого хода (рис. 6) видно, что форма кривой тока фазы С близка к синусоидальной, однако всё же не является чистой синусоидой. Данное обстоятельство, безусловно, является результатом погрешности применяемых измерителей, а также результатом действительного искажения кривой синусоиды из-за воздействия подключенных нелинейных нагрузок к электрической сети на момент проведения эксперимента. Нелинейность можно также обнаружить с помощью реализованной в комплексе функции фиксации и отображения гармонических составляющих тока и напряжения. Как видно, в режиме холостого хода (рис. 5а) форма кривой тока фазы С содержит гармонические составляющие с 1-й по 4-ю. Преимущественно проявляются нечетные гармонические составляющие.

Говоря о форме кривой, полученной комплексом, можно сказать, что в целом она удовлетворяет задачи мониторинга состояния работы электродвигателя.

Значение расчетного напряжения в данном режиме составляет 191,43 В, значение эталонного источника измерения изменяется в диапазоне от 186 до 189 В. Измеренное комплексом напряжение варьируется также в данном диапазоне. Расчетный ток в режиме холостого хода равен 0,22 А, при колебаниях показателей эталонного измерителя тока 0,24–0,25 А и показателей ОИК 0,22–0,27 А.

Соответственно, на основании полученных результатов, представленных комплексом, можно сделать однозначное заключение о нормальности данного режима, поскольку представленная информация явно демонстрирует симметричность режима, при этом значения параметров лежат в допустимых пределах. На основании таблицы сопоставления (табл. 2) также видно, что измеренные комплексом значения токов при холостом ходе до-

Таблица 2. Значения расчетных, измеренных и эталонных токов
 Table 2. Current values of calculated, measured and reference currents

Вид КЗ	Тип измерения	I_A, A			I_B, A			I_C, A		
		ХХ	КЗ	УКЗ	ХХ	КЗ	УКЗ	ХХ	КЗ	УКЗ
К ⁽¹⁾	Расчетное	0,22	0,99	0,96	0,22	0,13	0,23	0,22	0,30	0,29
	ОИК	0,24	0,78	0,78	0,26	0,29	0,29	0,29	0,36	0,35
	Эталон	0,24	0,97	0,96	0,24	0,3	0,25	0,25	0,26	0,25
К ⁽²⁾	Расчетное	0,22	0,82	0,75	0,22	0,95	0,95	0,22	0,23	0,37
	ОИК	0,25	0,92	0,94	0,26	0,83	0,84	0,26	0,47	0,48
	Эталон	0,25	0,92	0,94	0,25	0,83	0,85	0,24	0,47	0,49
К ^(1.1)	Расчетное	0,22	0,97	0,96	0,22	1,05	0,96	0,22	0,25	0,27
	ОИК	0,26	0,92	0,91	0,24	0,94	0,94	0,26	0,59	0,59
	Эталон	0,25	0,98	0,9	0,24	0,96	0,95	0,24	0,37	0,4
К ⁽³⁾	Расчетное	0,22	0,97	0,96	0,22	1,05	0,96	0,22	0,99	0,96
	ОИК	0,27	0,78	0,70	0,23	0,86	0,92	0,26	0,61	0,67
	Эталон	0,25	0,97	0,96	0,25	1,06	0,96	0,25	1,04	0,96

статочны близки к эталонным значениям тока. Их разница относительно расчетного значения тока холостого хода объясняется несовершенством модели и неидеальными условиями эксперимента. То есть в целом комплекс обеспечивает достаточную информативность для анализа и отслеживания режима при работе приемника в нормальном состоянии.

Оценка режима однофазного КЗ. При анализе полученных измерений, отраженных на рис. 2а, видно, что на интервале времени от 0 до 260 мс наблюдается некий бросок тока. Максимальное и минимальное значения напряжения на данном интервале времени составляют 235 В и 144 В, а тока — 0,500 А (ток IC) и 0,165 А (ток IB) соответственно. При этом работа двигателя продолжалась в режиме холостого хода. Данный эффект можно объяснить погрешностью измерительных устройств вследствие воздействия на них напряжения и токов соседних фаз, то есть избыточной чувствительностью измерителей. После 260 мс значения измеренных токов и напряжений возвращаются к значениям около 0,25 А и 185 В, что с определенной долей погрешности соответствует расчетным и эталонным значениям для холостого хода данного режима. В момент 1060 мс возникает аварийное событие.

На основании представленной осциллограммы действующих значений тока однозначно видно, что замыкание произошло в фазе А, поскольку ток в ней возрос в разы по сравнению с предыдущими значениями, а также по сравнению с текущими значениями токов в соседних фазах. Стоит отметить, что ток в неповрежденных фазах также увеличивается по сравнению с режимом холостого хода. На 1120 мс происходит окончательное затухание переходного аварийного процесса и наступает режим установившегося короткого замыкания. Однако обнаружить возникшее аварийное событие на основании осциллограммы действующих значений напряжений не представляется возможным, поскольку датчик, сочетающий в себе источник измерения напряжения и тока в одном устройстве, находится на удаленном расстоянии относительно точки КЗ.

Анализ векторных диаграмм короткого замыкания (рис. 4а) показывает, что ток в аварийной фазе превышает токи в неповрежденных фазах. Токи фаз В и С находятся в противофазе, поскольку в результате возникновения аварийного режима, работа двигателя сохраняется на оставшихся двух фазах. Вследствие этого возникает ток обратной и нулевой последовательностей, что провоцирует повышенный нагрев обмоток электродвигателя. Причем ток нулевой последовательности превышает значение тока обратной последовательности (рис. 4а).

Оценка режима двухфазного КЗ. Анализируя осциллограммы действующих значений токов и напряжений (рис. 2б), можно сделать однозначный вывод о состоянии режима на определенный момент времени. Так, например, видно, что на осциллограмме для режима двухфазного КЗ (рис. 2б) имеет место несколько различных состояний. В период с начала записи по 1020 мс двигатель работает в режиме холостого хода с током около 0,24–0,27 А и с напряжением 170–192 В действующих значений. В момент времени 1020 мс происходит аварийный режим в фазах А и В. Начинается переходный процесс с продолжительностью до 1080 мс. Более детально рассмотреть действующие значения при переходном процессе не представляется воз-

можным, поскольку память комплекса на текущий момент позволяет накопить информацию за 60 последних периодов с момента записи. Таким образом, так как в одном периоде 20 мс (при частоте 50 Гц), соответственно, расстояние между двумя соседними точками измерения достаточно велико. При необходимости режим переходного процесса можно рассмотреть подробнее с помощью мгновенных значений. Комплекс позволяет записать 88 точек измерения в одном периоде, таким образом, между двумя точками промежуток во времени составит 0,227 мс.

Оценка режима двухфазного КЗ на землю. Осциллограмма действующих значений токов (рис. 2в) показывает, что в отношении этих значений режим в целом аналогичен двухфазному КЗ. Однако можно заметить, что токи в режиме двухфазного КЗ на землю несколько превосходят значения в режиме двухфазного КЗ как в отношении поврежденных, так и в отношении неповрежденных фаз. Разумеется, токи в этих режимах превосходят токи однофазного КЗ при тех условиях, в которых проводились эксперименты.

Осциллограммы мгновенных значений тока (рис. 3в) говорят о наличии насыщения в измерительных элементах. Обусловлено это насыщением операционного усилителя, являющегося одной из основных составляющих схемы измерителя.

Из анализа спектрограмм (рис. 5) видно, что по сравнению с режимом холостого хода прослеживается уменьшение амплитуды третьей гармонической составляющей и увеличение пятой и седьмой составляющих. Характерно, что изменяются именно нечетные гармонические составляющие.

При сопоставлении результатов, измеренных комплексом и результатов эталонного источника данных, а также расчетных значений видно, что по сравнению с режимом двухфазного КЗ погрешность относительно эталонного значения возросла.

Оценка трехфазного КЗ. Осциллограмма показывает (рис. 2г), что ток трехфазного КЗ превосходит токи остальных коротких замыканий. То есть данное возмущение является наиболее тяжелым в отношении работы электродвигателя. Осциллограмма мгновенных значений (рис. 3г) также показывает, что измерительные устройства входят в насыщение по току. Причем в режиме трехфазного КЗ это явление более явное относительно двухфазного КЗ на землю.

Результат измерений комплекса в данном режиме заметно отличается от эталонных и расчетных значений. Это обусловлено эффектом насыщения, описанным и зафиксированным выше, из-за которого растёт погрешность измерения тока.

Заключение

На основании изложенного, однозначно можно сделать вывод, что данный измерительный комплекс достаточно достоверно дает представление о характере рассматриваемого на текущий момент режима. Комплекс имеет широкие функциональные возможности измерений: измерение фазных и линейных токов и напряжений; действующих и амплитудных токов и напряжений; максимального мгновенного значения тока и напряжения за измеряемый период; значений передаваемых активной, реактивной и полной мощностей; коэффициента мощности и др.

Бесконтактные измерения также позволяют обеспечить гальваническую развязку измеритель-

ных цепей относительно силовых. Указанное достоинство является серьезным аргументом в пользу повсеместного внедрения подобного рода комплексов. Данное решение может значительно увеличить уровень наблюдаемости режима в электроэнергетической системе [11]. Преобразование информации в цифровую форму на уровне датчиков позволяет совместить работу комплекса с другими цифровыми устройствами [12].

Тем не менее устройство требует определенной доработки и совершенствования: велика погрешность измерений, особенно при резких бросках тока; нехватка памяти головного узла комплекса. Однако эти недостатки не являются непреодолимыми.

Таким образом, предлагаемый оперативно-измерительный комплекс уже сейчас позволяет реализовать мониторинг электрических режимов для обеспечения надежной работы электротехнической системы. На его базе возможно реализовать различные устройства защиты, автоматики, управления и т. д. Разработанный прототип требует совершенствования и доработки. Необходимо уменьшать степень погрешности измерений. Осуществить это возможно посредством экранирования отдельных составляющих измерительного комплекса, реализацией изменения коэффициента усиления в режиме реального времени, а также применением более совершенных методов фильтрации с помощью программной и аппаратной обработки полученной физической величины.

Благодарности / Acknowledgments

Авторы выражают глубокую признательность научному руководителю Федянину Виктору Викторовичу, кандидату технических наук, доценту, за полезные замечания и советы, которые помогли в работе над статьей.

The authors express deep gratitude to the scientific supervisor Fedyanin Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, for useful comments and advice that have assisted at the work on the article.

Список источников / References

1. Дикарев П. В., Шилин А. А. Интеллектуальная релейная защита // Вестник молодежной науки России. 2019. № 2. С. 26. EDN: MDLLKQ.

Dikarev P. V., Shilin A. A. Intellektual'naya reley'naya zashchita [Intelligent relay protection]. Vestnik molodezhnoy nauki Rossii. *Journal of Youth Science*. 2019. No. 2. P. 26. EDN: MDLLKQ. (In Russ.).

2. Новокрещенов В. В., Иванова В. Р. Обзор современных устройств релейной защиты и автоматики и измерительных преобразователей, используемых при модернизации электротехнических комплексов и систем // Тинчуринские чтения: материалы XIV Междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. Т. 1, ч. 2. С. 81–85. EDN: YXWZOJ.

Novokreshchenov V. V., Ivanova V. R. Obzor sovremennykh ustroystv reley'noy zashchity i avtomatiki i izmeritel'nykh preobrazovateley, ispol'zuyemykh pri modernizatsii elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem [An overview of modern relay protection and automation devices and measuring transducers used for the modernization of electrical complexes and systems]. *Tinchurinskiye chteniya. Tinchurin Readings*. In 3 vols. Kazan, 2019. Vol. 1, part 2. P. 81–85. EDN: YXWZOJ. (In Russ.).

3. Фесенко М. Е., Скорик В. Г. Катушка Rogovskogo как альтернативный измерительный орган в релейной защите // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XX веке: тр. всерос. науч.-практ. конф. В 2 т. 2021. Т. 2. С. 63–67. EDN: IHEXLI.

Fesenko M. E., Skorik V. G. Katushka rogovskogo kak al'ternativnyy izmeritel'nyy organ v reley'noy zashchite [Rogovsky coil, as an alternative measuring organ in relay protection]. *Nauchno-tekhnicheskoye i Ekonomicheskoye Sotrudnichestvo Stran ATR v XX veke*. In 2 vols. 2021. Vol. 2. P. 63–67. EDN: IHEXLI. (In Russ.).

4. Peng Li, Youping Fan, Zhong Liu [et al.]. Application status and development trend of intelligent sensor technology in the electric power industry. *IET Science, Measurement and Technology*. 2024. No. 18 (4). P. 145–162. DOI: 10.1049/smt2.12175.

5. Peng Li, Bing Tian, Licheng Li [et al.]. A contactless current sensor based on TMR chips. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. No. 71. P. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2022.3191663.

6. Prasad Shrawane, Tarlochan Sidhu. Magnetic sensors for contactless and non-intrusive measurement of current in AC power systems. *The Journal of Engineering*. 2024. No. 6. P. 1–15. DOI: 10.1049/tje2.12371.

7. Xiangyu Tan, Wenbin Zhang, Mingxing He [et al.]. Non-contact adaptive voltage sensor based on electric field coupling principle. *Sensors*. 2023. No. 23 (19). 8316. P. 1–22. DOI: 10.3390/s23198316.

8. Qiang Zhou, Wei He, Dongping Xiao [et al.]. Study and experiment on non-contact voltage sensor suitable for three-phase transmission line. *Sensors*. 2015. No. 16 (1). P. 1–21. DOI: 10.3390/s16010040.

9. Боровых Д. Д., Егоров Е. В. Разработка и исследование устройства для бесконтактного измерения напряжения и тока // Ученые Омска — региону: материалы VIII Регион. науч.-техн. конф. / под общей ред. Л. О. Штриплинга. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. С. 11–18. EDN: BLEJGF.

Borovykh D. D., Egorov E. V. Razrabotka i issledovaniye ustroystva dlya beskontaktnogo izmereniya napryazheniya i toka [Development and research of a device for contactless voltage and current measurement]. *Uchenyye Omska — Regionu* / ed. by L. O. Shtripling. Omsk, 2023. P. 11–18. EDN: BLEJGF. (In Russ.).

10. Dawood A., Hasaneen B. M., Abdel-Aziz A. M. Design of an efficient neural network model for detection and classification of phase loss faults for three-phase induction motor. *Neural Computing and Applications*. 2024. No. 36 (11). P. 1–19. DOI: 10.1007/s00521-023-09387-y.

11. Chaolan Shen, Xiaohu Liu, Ke Jin [et al.]. Research on noncontact voltage measurement method for three-phase busbar of low-voltage distribution cabinets. *Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024. No. 73. P. 1–13. DOI: 10.1109/TIM.2024.3364266.

12. Bagherian A., Gershon M., Kumar S. [et al.]. Analyzing the relationship between digitalization and energy sustainability: A comprehensive ISM-MICMAC and DEMATEL approach. *Expert Systems with Applications*. 2024. No. 236 (4). DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121193.

ЕГОРОВ Егор Викторович, ассистент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 7947-4125

AuthorID (РИНЦ): 1204758

Адрес для переписки: Egorov10.2000@mail.ru

БОРОВЫХ Даниил Дмитриевич, ассистент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5931-2462

AuthorID (РИНЦ): 1168506

Адрес для переписки: themrfelix03050124@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 07.07.2025.

EGOROV Egor Viktorovich, Assistant of the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 7947-4125
AuthorID (RSCI): 1204758

Correspondence address: Egorov10.2000@mail.ru
BOROVYKH Daniil Dmitrievich, Assistant of the Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 5931-2462
AuthorID (RSCI): 1168506
Correspondence address: themrfelix03050124@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 14.05.2025; accepted for publication 07.07.2025.

УДК/UDC 621.317.628

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-103-110

EDN: TQUVUO

Научная статья / Original article

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СДВОЕННОГО ТИПА

С. В. Бирюков

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье предлагается новое конструктивное решение трехкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности электрического поля с чувствительными электродами в форме сферических двуугольников и их частей. В основу датчика положен двухкомпонентный датчик сдвоенного типа и однокомпонентный датчик двойного типа, чувствительные элементы которого являются частями сферических двуугольников, организованных в сферические сегменты с угловым размером θ_0 . Чувствительные электроды датчика — это тридцать шесть проводящих сферических поверхностей, изолированных друг от друга и от проводящего сферического основания датчика. Из чувствительных электродов формируются чувствительные элементы в форме сферических двуугольников для четырёх двойных датчиков по два на координатных осях x и y и в форме сферических сегментов для одного двойного датчика по координатной оси z .

Проведенные в работе исследования показали, что конструктивные размеры чувствительных элементов датчика и пространственный диапазон измерения влияют на его погрешность, вызванную неоднородностью поля. Оптимизированные конструктивные размеры чувствительных элементов датчика и ограниченный пространственный диапазон измерения позволили создать датчик с погрешностью от неоднородности поля по модулю, не превышающую погрешность $\pm 0,55\%$ в допустимом пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 0,5$, что соответствует минимальному расстоянию до источника поля $d = 2R$. Для обеспечения такой погрешности и такого пространственного измерения чувствительные элементы датчика в форме сферических двуугольников должны иметь угловые размеры $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$, а в форме сферического сегмента угловой размер должен быть $\theta_0 = 61,5^\circ$.

Предложенный трехкомпонентный сферический датчик может стать основой измерителя напряженности электрического поля промышленной частоты.

Ключевые слова: электрическое поле, напряженность поля, трехкомпонентный сферический датчик, чувствительный электрод, чувствительный элемент, сферический двуугольник, сферический сегмент, погрешность от неоднородности поля.

Для цитирования: Бирюков С. В. Трехкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 103–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-103-110. EDN: TQUVUO.



© Бирюков С. В., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

THREE-COMPONENT SPHERICAL DUAL-TYPE ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSOR

S. V. Biryukov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article proposes a new design solution for a three-component electroinductive spherical electric field strength sensor with sensitive electrodes in the form of spherical digons and their parts. The sensor is based on a two-component dual-type sensor and a single-component dual-type sensor, the sensitive elements of which are parts of spherical digons organized into spherical segments with an angular size of θ_0 .

The sensitive electrodes of the sensor are thirty-six conductive spherical surfaces isolated from each other and from the conductive spherical base of the sensor. The sensitive electrodes are used to form sensitive elements in the form of spherical digons for four dual sensors, two on the x and y coordinate axes, and in the form of spherical segments for one dual sensor along the z coordinate axis. The studies conducted in the work showed that the design dimensions of the sensitive elements of the sensor and the spatial measurement range affect its error caused by the field inhomogeneity. Optimized design dimensions of the sensor's sensitive elements and limited spatial measurement range made it possible to create a sensor with an error from field inhomogeneity in modulus not exceeding an error of $\pm 0.55\%$ in the permissible spatial measurement range of $0 \leq a \leq 0.5$, which corresponds to a minimum distance to the field source of $d = 2R$. To ensure such an error and such spatial measurements, the sensor's sensitive elements in the form of spherical digons must have angular dimensions of $\alpha_0 = 90^\circ$ and $\beta_{01} = 30^\circ$, and in the form of a spherical segment, the angular size must be $\theta_0 = 61.5^\circ$.

The proposed three-component spherical sensor can form the basis of an industrial frequency electric field strength meter.

Keywords: electric field, field strength, three-component spherical sensor, sensitive electrode, sensitive element, spherical digon, spherical segment, error from field inhomogeneity.

For citation: Biryukov S. V. Three-component spherical dual-type electric field strength sensor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 103–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-103-110. EDN: TQUVUO.



© Biryukov S. V., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Электрическое поле (ЭП) — это одно из состояний материи, в котором человек пребывает с момента рождения. Как показывает многовековой опыт, ЭП не самое комфортное условие пребывания человека. ЭП внешне мало чем себя проявляет и практически всегда остается незамеченным. Простейшим проявлением ЭП являются электрические разряды между телом человека и проводящими поверхностями. Долгое время никто не изучал воздействие ЭП на человеческий организм, окружающую среду и технику. Моментом начала изучения воздействия ЭП на человека можно считать начало восьмидесятых годов прошлого века [1–3]. В это время бурное развитие получили линии электропередач 300, 500 и 1150 кВ, являющиеся мощными источниками ЭП.

Для изучения механизма воздействия ЭП на человека потребовались средства их контроля и измерений. Прежде чем создавать такие средства, необходимо было выяснить, какой из параметров ЭП, оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека. Таким параметром оказалась напряженность ЭП. В соответствии с определениями, приведёнными в учебниках по общей физике, понятие напряженности ЭП формулируется как «... напряженность ЭП — это физическая величина, равная силе, действующей на единичный положительный заряд». Из определения следует, что для прямого измерения напряженности ЭП необходимо измерять силу, действующую на внесенный в поле электрический заряд. Однако это практически невозможно. Известны [4, 5] только два устройства, основанные на силовом воздействии поля, относящиеся к прямому виду измерений.

В первом устройстве [4] в качестве чувствительного элемента (ЧЭЛ) используется проводящая пластина. При внесении её в ЭП на ЧЭЛ будет действовать сила, определяемая выражением $F = (1/2) \cdot \epsilon \epsilon_0 E^2$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится чувствительный элемент датчика; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; E — напряженность ЭП.

Во втором устройстве [5] ЧЭЛ выполнен в виде двух вытянутых конусов из электрета, основания которых пристыкованы друг к другу. ЧЭЛ закрепляется на подвесе, снабженном ограничителем вращающегося момента. При внесении балки в ЭП за счет сил кулоновского взаимодействия балка поворачивается на угол, пропорциональный напряженности ЭП.

Таким образом, практически все известные устройства, воспринимающие напряженность поля, основаны на различных проявлениях их взаимодействия с электрическим полем, а следовательно, относятся к косвенному виду измерений. Первичным измерительным преобразователем, воспринимающим напряженность ЭП, является первичный измерительный преобразователь — датчик. В основе построения датчиков лежат физические явления и эффекты. К ним можно отнести электроэлектрические, электромагнитные, электромеханические, электротепловые, электрооптические, электропространственные и другие явления, эффекты [6].

В работе [6] показано, что наиболее широкое распространение для построения датчиков напряженности ЭП получили электроэлектрические эффекты, в частности эффект электростатической индукции — наведение электрических зарядов на проводящую поверхность под действием ЭП. Датчики, основанные на электростатической индукции, называются электроиндукционными датчиками. В основе электроиндукционных датчиков [6] лежит проводящая сфера и изолированные друг от друга и от неё проводящие поверхности ЧЭЛ в форме сферических сегментов или их частей. Такие датчики достигли предела минимальной погрешности при измерении неоднородных ЭП, составляющей $\approx \pm 5\%$ в полном пространственном диапазоне от ∞ до 0. Поэтому потребовались иные компоновки построения датчиков. И такие новые компоновки датчиков были предложены в работах [7–10]. Перекомпоновка элементов известных датчиков привела к формированию датчиков нового типа — сдвоенных датчиков. Таким образом, к одинарному и двойному типам датчиков добавил-

ка третий тип — сдвоенный. Сдвоенный тип датчика позволил снизить погрешность датчика в неоднородном поле до $\approx \pm 2\%$.

В настоящее время разработчики датчиков напряженности ЭП стремятся снизить погрешности, вызванные неоднородностью поля; принять новый концептуальный подход к процессу измерения и новые конструктивные решения чувствительных электродов (ЧЭ) датчика.

Концептуальный подход к процессу измерения связан с ограничением пространственного диапазона измерения датчика. А новые конструктивные решения элементов датчика связаны с использованием ЧЭЛ в форме сферических двуугольников. Разработанный сдвоенный двухкомпонентный сферический датчик, представленный в работе [11], подтвердил возможность снижения его погрешности от неоднородного поля до $\approx \pm 1\%$ в полном пространственном диапазоне измерений. Однако двухкомпонентный датчик усложняет процесс измерения вектора напряженности ЭП, т.к. его нахождение требует многократной ориентации датчика в данной точке пространства ЭП.

В связи с этим дальнейшие исследования должны быть направлены на построение трехкомпонентного сферического датчика напряженности ЭП сдвоенного типа с двуугольными ЧЭ и с погрешностью его измерения ниже по модулю $\approx 1\%$.

Постановка задачи

На основании вышеизложенного в задачах исследования необходимо сформулировать задачи, решение которых позволило бы:

- 1) предложить новое конструктивное решение построения трёхкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и их частей, позволяющее расширить функциональные возможности датчика по отношению к известному;
- 2) обобщить известные теоретические положения по взаимодействию электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП с полями различной неоднородности и применить их к предложенному трёхкомпонентному датчику;
- 3) провести оценку погрешности трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП, вызванную неоднородностью поля и свести её к желаемому минимуму в допустимом пространственном диапазоне измерений.

Двухкомпонентный датчик ЭП — основа трехкомпонентного датчика

Целью работы является исследование возможности создания трехкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и их частей.

При исследовании положим в основу создаваемого нового датчика — двухкомпонентный датчик с двуугольными сферическими ЧЭ, рассмотренный в работе [11] и представленный на рис. 1.

Обозначим ЧЭ двухкомпонентного датчика буквой S с соответствующим номером ЧЭ и нумерацию начнем с цифры 2. Таким образом, исходный двухкомпонентный датчик будет состоять из проводящего сферического основания 1 и двенадцати проводящих ЧЭ $S2-S13$ в форме сферических двуугольников, изолированных друг от друга и от проводящего сферического основания 1. Угловой размер ЧЭ составляет $\pm \beta_0 = 15^\circ$, а его размах

$\beta_{01} = 30^\circ$ (рис. 1). ЧЭ формируются путем разрезания лазерным резаком поверхностного слоя проводника на двенадцать равных частей. Поверхностный слой проводника предварительно на изоляционный слой сферического основания 1 датчика.

Двухкомпонентный датчик организуется так, что на координатных осях x и y располагаются шесть диаметрально противоположных пар ЧЭ. Так, на координатной оси x располагаются ЧЭ $S5 \rightarrow S11$, $S6 \rightarrow S12$, $S7 \rightarrow S13$, $S8 \rightarrow S2$, $S9 \rightarrow S3$ и $S10 \rightarrow S4$, а на координатной оси y ЧЭ $S2 \rightarrow S8$, $S3 \rightarrow S9$, $S4 \rightarrow S10$, $S5 \rightarrow S11$, $S6 \rightarrow S12$ и $S7 \rightarrow S13$ [11]. По координатным осям x и y из указанных ЧЭ формируются ЧЭЛ сдвоенных датчиков. Сдвоенные датчики организуются из двух двойных датчиков. Первые двойные датчики формируются из объединения ЧЭ в ЧЭЛ: по оси x $(S7 + S8) \rightarrow (S2 + S13)$ по оси y $(S4 + S5) \rightarrow (S10 + S11)$. А вторые двойные датчики объединяют следующие ЧЭ в ЧЭЛ: по оси x $(S5 + S6 + S7 + S8 + S9 + S10) \rightarrow (S11 + S12 + S13 + S2 + S3 + S4)$ по оси y $(S2 + S3 + S4 + S5 + S6 + S7) \rightarrow (S8 + S9 + S10 + S11 + S12 + S13)$. Таким образом, ЧЭ первых двойных датчиков служат сферические двуугольники с угловыми размерами $\alpha_0 = \pm 90^\circ$ и $\beta_{01} = \pm 30^\circ$, а вторых двойных датчиков — полусферы, для которых $\alpha_0 = \pm 90^\circ$ и $\beta_{02} = \pm 90^\circ$ (рис. 1). Для объединения ЧЭ в ЧЭЛ служат измерительные цепи [11]. Рассмотренный датчик позволяет выделять только две компоненты вектора напряженности ЭП по осям x и y . Поэтому для создания трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП потребуется новое конструктивное решение, основу которого составит описанный выше двухкомпонентный датчик. При этом встает вопрос: как в двухкомпонентном датчике выделить третью компоненту?

Идея выделения из ЧЭ двухкомпонентного датчика ЧЭЛ третьей компоненты пришла не сразу, хотя она лежала на поверхности. Суть идеи состоит в отсечении двух диаметрально противоположных полюсов двухкомпонентного сферического датчика двумя параллельными плоскостями. Плоскости проходят перпендикулярно оси z и ограничиваются угловым размером θ_0 между лучом, выходящим из центра сферического основания и проходящим через края плоскостей (рис. 2). Отсечение выполняется лазерным резаком, так же как и при формировании ЧЭ основного двухкомпонентного датчика.

Такое конструктивное решение приводит к разделению каждого из двенадцати сферических двуугольников на три части $Si.1$, $Si.2$, $Si.3$, где $i = 2, 3, \dots, 13$. Всего получается тридцать шесть частей ЧЭ, из которых необходимо сформировать ЧЭЛ датчика по координатным осям x , y и z . По координатным осям x и y ЧЭ будут в форме сферических двуугольников $S2-S13$ (рис. 1). Для получения полных сферических двуугольников $S2-S13$ необходимо объединить ЧЭ $(Si.1 + Si.2 + Si.3)$, где $i = 2, 3, \dots, 13$. Объединённые таким образом ЧЭ будут участвовать в формировании ЧЭЛ по координатным осям x и y . По координатной оси z в качестве ЧЭЛ будут выступать два составных диаметрально противоположных сферических сегмента, состоящих из двенадцати ЧЭ, один — из объединённых ЧЭ $S2.1 \dots S13.1$, а другой — из объединённых ЧЭ $S2.3 \dots S13.3$.

Таким образом, предложено новое конструктивное решение построения трёхкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности ЭП, ЧЭ которого состоят из сферических двуугольников и их частей.

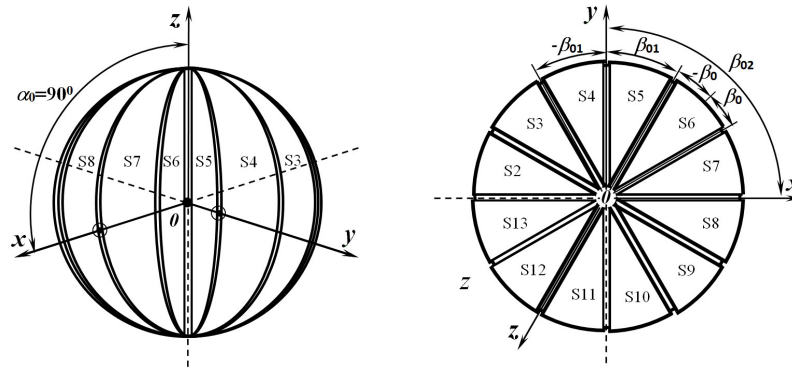


Рис. 1. Конструктивное решение двухкомпонентного датчика
 Fig. 1. Design solution of a two-component sensor

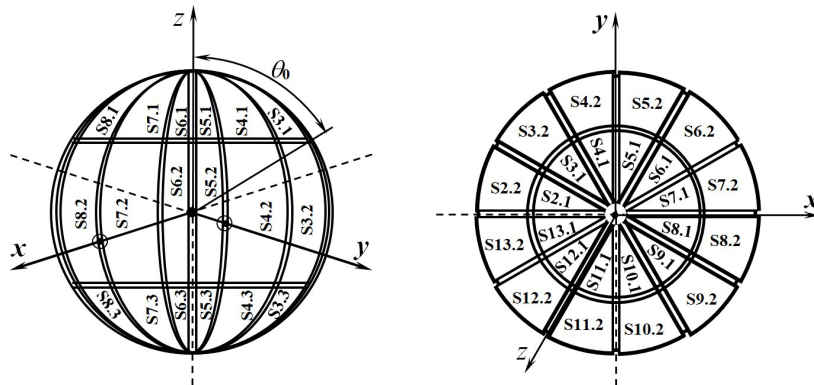


Рис. 2. Конструктивное решение трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП
 Fig. 2. Design solution of a three-component electric field strength sensor

Рассмотрим теоретические положения, которые можно применить для исследования взаимодействия предложенного датчика с полями различной неоднородности.

Краткая теория

В рассмотрении взаимодействия предложенного датчика с полями различной неоднородности могут участвовать однородные ЭП свободного пространства и неоднородные ЭП точечного заряда, диполя и квадруполья. Поля диполя и квадруполья хотя и обладают большей неоднородностью по отношению к полю точечного заряда, но они быстро затухают: у диполя обратно пропорционально кубу ($1/r^3$), у квадруполья — обратно пропорционально четвертой степени ($1/r^4$) расстояния до источника поля. Поэтому эти поля в работе рассматриваться не будут.

Для удобства представления теоретических положений условно представим предложенный трехкомпонентный датчик в виде двух датчиков — двухкомпонентного сдвоенного датчика с ЧЭЛ в форме сферических двуугольников [11] и однокомпонентного двойного датчика с ЧЭЛ в форме сферических сегментов [12]. Из ЧЭ датчика по координатным осям x и y формируются два двойных датчика, входящих в состав двухкомпонентного сдвоенного датчика [11], а по координатной оси z — один двойной датчик [12].

ЧЭЛ двойных датчиков состоят из объединенных ЧЭ:

— по координатной оси x
 $(S7 + S8) \rightarrow (S2 + S13)$ и $(S5 + S6 + S7 + S8 + S9 + S10) \rightarrow (S11 + S12 + S13 + S2 + S3 + S4)$;

— по координатной оси y
 $(S4 + S5) \rightarrow (S10 + S1)$ и $(S2 + S3 + \dots + S7) \rightarrow (S8 + S9 + \dots + S13)$ (рис. 1).

ЧЭЛ двойного датчика, расположенного по координатной оси z , состоят из объединенных ЧЭ: $(S2.1 + S3.1 + \dots + S13.1) \rightarrow (S2.3 + S3.3 + \dots + S13.3)$ (рис. 3).

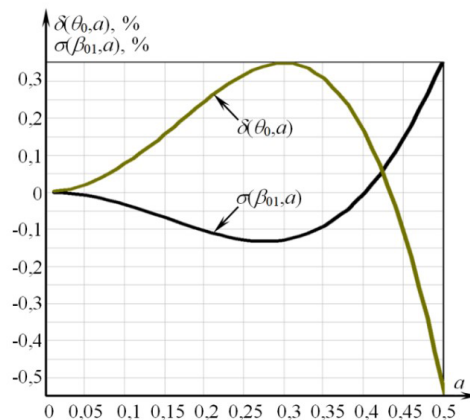


Рис. 3. Графики погрешностей $\sigma(\beta_{01}, a)$ и $\delta(\theta_0, a)$ от неоднородности ЭП по координатным осям x , y и z при оптимальных угловых размерах $\beta_{01} = 30^\circ$ и $\theta_0 = 61,5^\circ$ чувствительных элементов датчика
 Fig. 3. Graphs of errors $\sigma(\beta_{01}, a)$ and $\delta(\theta_0, a)$ from the non-uniformity of the electric field along the coordinate axes x , y and z at optimal angular dimensions $\beta_{01} = 30^\circ$ and $\theta_0 = 61,5^\circ$ of the sensitive elements of the sensor

Объединение ЧЭ датчика в ЧЭЛ осуществляется посредством измерительной цепи. Измерительная цепь включает в себя 18 дифференциальных интеграторов тока (ДИТ) и группу суммирующих устройств. Дифференциальные интеграторы тока (усилители заряда [14]) преобразуют разности электрических зарядов, индуцированных ЭП на диаметрально противоположных ЧЭ датчика в электрическое напряжение. Суммирующие устройства суммируют выходные сигналы с ДИТ по определенному алгоритму, формируя выходные сигналы трехкомпонентного датчика $U_x(t)$, $U_y(t)$ и $U_z(t)$, пропорциональные составляющим вектора напряженности ЭП.

Применение ДИТ позволило осуществить гальваническую развязку между ЧЭ датчика, исключая их взаимосвязь друг с другом, виртуально объединить ЧЭ через близкий к нулю входной импеданс ДИТ и исключить зависимость выходных напряжений ДИТ от частоты входного сигнала.

Выделим в работе [11] основные теоретические результаты, полученные для двухкомпонентного датчика с ЧЭ в форме сферических двуугольников.

Выходными сигналами двойных датчиков служат дифференциальные заряды

$$\Delta q(t) = q_1(t) - q_2(t), \quad (1)$$

где $q_1(t)$ и $q_2(t)$ — заряды, индуцированные на диаметрально противоположных чувствительных элементах первого и второго двойных датчиков.

В однородном поле заряды $q_1(t)$ и $q_2(t)$ будут соответственно равны [11]

$$q_{1,2\text{одн.}}(t) = \mp 3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{0i} \cdot E_0(t), \quad (2)$$

где знак « $-$ » соответствует ЧЭЛ 1, в который входит, а знак « $+$ » соответствует ЧЭЛ 2, из которого выходит вектор напряженности ЭП; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; R — радиус сферического основания датчика; β_{0i} — угловой размер ЧЭЛ (рис. 1); $i = 1, 2$ — соответствует первому или второму ЧЭЛ; $E_0(t)$ — напряженность однородного ЭП.

В неоднородном поле точечного заряда те же индуцированные поля заряды на ЧЭЛ 1 и ЧЭЛ 2 будут равны [11]

$$q_{1\text{неодн.}}(t) = -3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{0i} \times \frac{2}{3\pi \sin\beta_{0i}} \int_0^\pi \int_0^{\arctan\left(\frac{tg\beta_{0i}}{\sin\alpha}\right)} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1-2a\cos\beta+a^2)^3}} - 1 \right] \times \cos\beta \cdot da \cdot d\beta \cdot E(t). \quad (3)$$

$$q_{2\text{неодн.}}(t) = 3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{0i} \times \frac{2}{3\pi \sin\beta_{0i}} \int_0^\pi \int_0^{\arctan\left(\frac{tg\beta_{0i}}{\sin\alpha}\right)} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1+2a\cos\beta+a^2)^3}} - 1 \right] \times \cos\beta \cdot da \cdot d\beta \cdot E(t), \quad (4)$$

где $a = R/d$ — относительное расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля, характеризующее степень неоднородности поля (при $a \rightarrow 0$ поле стремится к однородному полю, при $a \rightarrow 1$ степень неоднородности поля увеличивается); R — радиус сферического основания датчика; d — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля; $E(t)$ — напряженность

неоднородного ЭП в точке, совмещенной с центром сферического основания датчика.

Таким образом, дифференциальная разность зарядов в соответствии с выражениями (1) — (4) определится как

— в однородном поле

$$\Delta q_{\text{одн.}}(t) = q_{1\text{одн.}}(t) - q_{2\text{одн.}}(t) = 6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{0i} \cdot E_0(t); \quad (5)$$

— в неоднородном поле точечного заряда (с учетом выражений (3) и (4))

$$\Delta q_{\text{неодн.}}(t) = q_{1\text{неодн.}}(t) - q_{2\text{неодн.}}(t) = 6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{0i} [1 + \delta(\beta_{0i}, a)] E(t), \quad (6)$$

где $\delta(\beta_{0i}, a)$ — погрешности, вызванные неоднородностью ЭП точечного заряда первого (при β_{01}) и второго (при β_{02}) двойного датчика, определяемые из выражения

$$\delta = \frac{\Delta q_{\text{неодн.}} - \Delta q_{\text{одн.}}}{\Delta q_{\text{одн.}}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где β_{0i} — угловой размер сферических двуугольников первого β_{01} и второго β_{02} сдвоенного датчика (рис. 1).

Поскольку по координатным осям x и y формируются сдвоенные датчики, состоящие из двух двойных, то погрешность от неоднородности поля сдвоенного датчика будет определяться как [13]

$$\sigma(\beta_{01}, a) = \frac{\delta(\beta_{01}, a) + \delta(\beta_{02}, a)}{2}. \quad (8)$$

Сдвоенные датчики формируются так, чтобы погрешности $\delta(\beta_{01}, a)$ и $\delta(\beta_{02}, a)$ двойных датчиков были противоположны по знаку [13]. Это требование позволяет значительно уменьшить погрешность $\sigma(\beta_{01}, a)$ сдвоенного датчика.

По третьей координате z используется только двойной датчик. Поэтому воспользуемся основными теоретическими результатами, приведенными в работе [12] для однокомпонентного двойного датчика с ЧЭЛ в форме сферических сегментов. Запишем выражения для электрических зарядов $q_1(t)$ и $q_2(t)$, индуцированных на диаметрально противоположных ЧЭЛ и их разности в однородном и неоднородном ЭП.

В однородном поле заряды $q_1(t)$ и $q_2(t)$ и их разность будут соответственно равны [12]

$$q_{1,2\text{одн.}}(t) = \mp 3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E_0(t);$$

$$\Delta q_{\text{одн.}}(t) = q_{1\text{одн.}}(t) - q_{2\text{одн.}}(t) = 6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E_0(t). \quad (9)$$

В неоднородном поле точечного заряда, индуцированные поля на сферических сегментах заряды и их разность, будут определяться выражениями:

$$q_{1\text{неодн.}}(t) = -3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot \sin^2\theta_0 \times \left[\frac{1}{6a \cos^2\frac{\theta_0}{2}} - \left(\frac{1+a}{3a^2 \sin^2\theta_0} \right) \right] \times \left[1 - \frac{1-a}{\sqrt{1-2a\cos\theta_0+a^2}} \right] \cdot E(t); \quad (10)$$

$$q_{2\text{неодн.}}(t) = 3\pi\epsilon_0 R^2 \cdot \sin^2 \theta_0 \times \left[\frac{1}{6a \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} + \left(\frac{1-a}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{1+a}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) \right] \cdot E(t). \quad (11)$$

$$\Delta q_{\text{неодн.}}(t) = q_{1\text{неодн.}}(t) - q_{2\text{неодн.}}(t) = 6\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_0 [1 + \delta(\theta_0, a)] E(t), \quad (12)$$

где $\delta(\theta_0, a)$ — погрешность, вызванная неоднородностью ЭП точечного заряда, определяемая из выражения (7) после подстановки в него выражений (9) и (12)

$$\delta(\theta_0, a) = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) \right] \cdot 100, \quad (13)$$

где θ_0 — угловой размер сферического сегмента (рис. 2).

Оценка погрешности трехкомпонентного датчика

Как показано выше, выходными сигналами трехкомпонентного датчика являются напряжения $U_x(t)$, $U_y(t)$ и $U_z(t)$, пропорциональные составляющим $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$ вектора напряженности ЭП $E(t)$. С учетом сказанного можно записать

— для однородного поля

$$\begin{aligned} E_x(t) &= G_x U_x(t) = E_{0x}(t) \\ E_y(t) &= G_y U_y(t) = E_{0y}(t), \\ E_z(t) &= G_z U_z(t) = E_{0z}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

где $E_{0x}(t)$, $E_{0y}(t)$ и $E_{0z}(t)$ — составляющие вектора напряженности однородного ЭП; G_x , G_y и G_z — чувствительности датчика по составляющим x , y и z , настроенные так, что $G_x = G_y = G_z = G$ составляющие вектора напряженности ЭП $E(t)$, соответственно равные

— для неоднородного поля

$$\begin{aligned} E_x(t) &= G_x U_x(t) [1 + \sigma_x(\beta_{01}, a)] = E_{0x}(t) \cdot [1 + \sigma_x(\beta_{01}, a)] \\ E_y(t) &= G_y U_y(t) [1 + \sigma_y(\beta_{01}, a)] = E_{0y}(t) \cdot [1 + \sigma_y(\beta_{01}, a)], \\ E_z(t) &= G_z U_z(t) [1 + \delta_z(\theta_0, a)] = E_{0z}(t) \cdot [1 + \delta_z(\theta_0, a)] \end{aligned} \quad (15)$$

где $\sigma_x(\beta_{01}, a) = \sigma_y(\beta_{01}, a) = \sigma(\beta_{01}, a)$ и $\sigma_z(\beta_{01}, a)$ — погрешности датчика по составляющим x , y и z датчика, зависящие от угловых размеров ЧЭЛ и пространственного диапазона измерений $a = R/d$.

В работах [6] и [11] показано, что оптимальные угловые размеры ЧЭЛ с точки зрения минимума погрешности и максимума пространственного диапазона измерений датчика соответственно равны $\theta_0 = 61,5^\circ$, а $\beta_{01} = 30^\circ$.

С целью безопасности проведения измерений максимальный возможный пространственный диапазон измерений должен быть ограничен диапазоном $0 \leq a \leq 0,5$. Тогда минимально возможное расстояние до источника поля будет $d \geq 2R$, т.е. про свет между датчиком и источником поля не должен

быть меньше радиуса R сферического основания датчика.

Рассчитаем погрешности $\sigma_x(\beta_{01}, a)$ и $\delta(\theta_0, a)$ при постоянных значениях $\beta_{01} = 30^\circ$ и $\theta_0 = 61,5^\circ$. Построим графические зависимости этих погрешностей от пространственного диапазона a в диапазоне $0 \leq a \leq 0,5$ и представим их на рис. 3.

Из графиков погрешностей, представленных на рис. 3, следует, что погрешности составляющих модуля вектора напряженности ЭП в пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 0,5$ может изменяться от $-0,55\%$ до $+0,35\%$.

Оценим теперь результирующую погрешность от неоднородного поля трехкомпонентного датчика. Восстановим модуль вектора напряженности ЭП по его составляющим как

$$E(t) = \sqrt{E_x^2(t) + E_y^2(t) + E_z^2(t)}, \quad (16)$$

где $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$ — составляющие модуля вектора напряженности ЭП, определяемые выражениями (15).

После подстановки выражений (15) для $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$ в выражение (16) и последующего преобразования получим

$$E(t) = E_0(t) [1 + \sigma(\beta_{01}, a)] \times \sqrt{1 + \cos^2 \gamma \left[\left(\frac{1 + \delta(\theta_0, a)}{1 + \sigma(\beta_{01}, a)} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (17)$$

где $E_0(t)$ — напряженность ЭП в точке измерения в отсутствие датчика; $\cos \gamma$ — направляющий косинус по оси z .

Определим по известной формуле $\epsilon = [E(t) - E_0(t)]/E_0(t)$ результирующую погрешность измерения модуля вектора неоднородного ЭП

$$\epsilon(a, \gamma) = \left\{ \frac{[1 + \sigma(\beta_{01}, a)] \times \sqrt{1 + \cos^2 \gamma \cdot \left[\left(\frac{1 + \delta(\theta_0, a)}{1 + \sigma(\beta_{01}, a)} \right)^2 - 1 \right]} - 1}{[1 + \sigma(\beta_{01}, a)]} \right\} \cdot 100. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что погрешность $\epsilon(a, \gamma)$ зависит от угла поворота γ относительно оси z .

Исследуем влияние угла поворота γ на погрешность $\epsilon(a, \gamma)$. Рассмотрим два крайних случая. Первый случай соответствует углу поворота $\gamma = 90^\circ$, а второй — углу поворота $\gamma = 0$.

В первом случае при $\gamma = 90^\circ$ направляющий косинус $\cos \gamma = 0$, тогда получим, что $\epsilon(a, \gamma) = \sigma(\beta_{01}, a)$. Во втором случае при $\gamma = 0$ направляющий косинус $\cos \gamma = 1$, тогда

$$\epsilon(a, \gamma) = \left\{ [1 + \sigma(\beta_{01}, a)] \sqrt{1 + \left[\left(\frac{1 + \delta(\theta_0, a)}{1 + \sigma(\beta_{01}, a)} \right)^2 - 1 \right]} - 1 \right\} \cdot 100. \quad (19)$$

После раскрытия скобок и преобразования выражения (19) устанавливаем, что $\epsilon(a, \gamma) = \delta(\theta_0, a)$. Теперь уточним поведение погрешности $\epsilon(a, \gamma)$ в диапазоне изменения угла поворота $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$ датчика относительно оси z . Для этого построим четыре графические зависимости погрешности $\epsilon(a, \gamma)$ при $\gamma = 0$, $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$ и представим их на рис. 4. Из представленных графиков

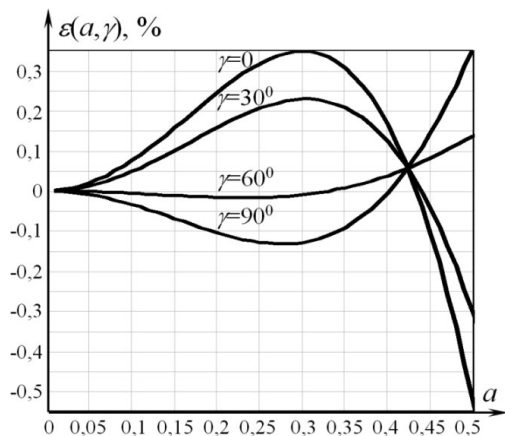


Рис. 4. Графики погрешности $\varepsilon(a, \gamma)$ трёхкомпонентного датчика при углах $\gamma = 0$, $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$ его поворота зависимости относительно координатной оси z
 Fig. 4. Graphs of the error $\varepsilon(a, \gamma)$ of a three-component sensor at angles $\gamma = 0$, $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ and $\gamma = 90^\circ$ of its rotation relative to the coordinate axis z

(рис. 4) следует, что результирующая погрешность трёхкомпонентного датчика не выходит за пределы $-0,55\% \leq \varepsilon(a, \gamma) \leq +0,35\%$ в пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 0,5$. Отсюда можно заключить, что предельная результирующая погрешность трёхкомпонентного датчика от неоднородности ЭП не превысит $\pm 0,55\%$.

Таким образом, исследование показало, что результирующая погрешность трёхкомпонентного датчика от неоднородности поля не будет выходить за пределы погрешностей, ограниченных кривыми, представленными на рис. 3.

Выводы и заключение

По итогам исследования можно заключить, что все поставленные задачи решены, и сформулировать следующие выводы:

1. Предложено новое конструктивное решение трёхкомпонентного сферического датчика напряженности электрического ЭП с чувствительными электродами в форме сферических двуугольников и их частей, позволяющее расширить функциональные возможности датчика по отношению к известному.

2. Проанализированы известные теоретические положения, разработанные для электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и сферических сегментов, сделано их обобщение, результаты которого применены к новому трёхкомпонентному датчику.

3. Проанализированы погрешности каждой составляющей модуля вектора напряженности ЭП, определены параметры датчика и поля, влияющие на эту погрешность, и сделана оценка результирующей погрешности трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП, вызванная неоднородностью поля.

4. Установлено, что на погрешность датчика оказывают влияние угловые размеры ЧЭ датчика и пространственный диапазон измерения a , характеризующий степень неоднородности поля.

5. Определены оптимальные угловые размеры ЧЭ датчика, обеспечивающие ему минимальную

погрешность в допустимом пространственном диапазоне измерений.

6. Установлено, что оптимальные размеры ЧЭ датчика в форме сферических двуугольников должны быть $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_0 = 30^\circ$, а в форме сферических сегментов — $\theta_0 = 61,5^\circ$.

7. С целью электробезопасности работы с датчиком в ЭП введено ограничение пространственного диапазона измерений. В связи с этим пространственный диапазон из полного диапазона $0 \leq a < 1$ стал допустимым диапазоном $0 \leq a \leq 0,5$.

8. Установлено, что предельная погрешность от неоднородности ЭП трёхкомпонентного датчика при оптимальных размерах его ЧЭ и допустимом пространственном диапазоне измерений не превышает $\pm 0,55\%$.

В заключение необходимо сказать, что предложенный в работе трёхкомпонентный электроиндукционный сферический датчик напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и их частей может быть использован для построения измерителя напряженности ЭП. Следовательно, следующий этап работы будет направлен на разработку измерителя напряженности ЭП с предложенным трёхкомпонентным датчиком.

Список источников / References

- Коробкова В. П., Морозов Ю. А., Столяров М. Д. [и др.]. Воздействие электрического поля распределительных устройств 500 и 750 кВ на обслуживающий персонал и средства для его защиты // Подстанции переменного тока: Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Москва: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
- Korobkova V. P., Morozov Yu. A., Stolyarov M. D. [et al.]. Vozdeystviye elektricheskogo polya raspredelitel'nykh ustroystv 500 i 750 kV na obsluzhivayushchiy personal i sredstva dlya ego zashchity [Impact of the electric field of 500 and 750 kV on personnel and means for their protection]. Podstantsii peremennogo toka. *Alternating Current Substations*. Moscow, 1974. P. 33–43. (In Russ.).
- Нормы и правила по охране труда при работах на подстанциях и воздушных линиях электропередачи напряжением 400, 500 и 750 кВ переменного тока промышленной частоты № 868-70. Москва: СЦНТИ ОРГЭС, 1972. 11 с.
- Normy i pravila po okhrane truda pri rabotakh na podstantsiyakh i vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi napryazheniyem 400, 500 i 750 kV peremennogo toka promyshlennoy chastoty № 868-70 [Rules and regulations on labor, protection at 400, 500, and 750 kV A. C. substations and overhead lines of industrial frequency]. Moscow, 1972. 11 p. (In Russ.).
- ГОСТ 12.1.002–84. Система безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Москва: Из-во стандартов, 1984. 8 с.
- GOST 12.1.002–84. Sistema bezopasnosti truda. Elektricheskiye polya promyshlennoy chastoty. Dopustimyye urovni napryazhennosti i trebovaniya k provedeniyu kontrolya na rabochikh mestakh [Occupational safety standards system. Power frequency electric fields. Permissible levels of field strength and requirements for control at work-places]. Moscow, 1984. 8 p. (In Russ.).
- Hyberg B. R., Herstad K., Larsen K. B. Measuring electric field using pressure sensitive elements. *IEEE Conference Record of International Symposium on Electrical Insulation*. 1978. P. 90–93.
- A. s. 1478159 A1 СССР, МКИ G01R 29/12. Индикатор электростатического поля / М. Ю. Бродский, О. В. Харламов, А. С. Малевский-Малевич, А. К. Евменко. № 4236759/24-09; заявл. 28.04.87; опубл. 07.05.89, Бюл. № 17.
- A. s. 1478159 A1 USSR, IPC G01R 29/12. Indikator elektrostatsicheskogo polya [Electrostatic field indicator] /

М. Yu. Brodskiy, O. V. Kharlamov, A. S. Malevskiy-Malevich, A. K. Evmenko. No. 4236759/24-09. (In Russ.).

6. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Проектирование электроиндукционных датчиков и средств измерений электрических полей: моногр. Санкт-Петербург: Реноме, 2022. 180 с. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46.

Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. *Proyektirovaniye elektroinduktsionnykh datchikov i sredstv izmereniy elektricheskikh poley* [Design of electroinductive sensors and electric field measuring instruments]. Saint Petersburg, 2022. 180 p. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. (In Russ.).

7. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Сдвоенные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67. EDN: AVJDSB.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Sdvoynnyye sfericheskiye datchiki napryazhennosti nizkochastotnykh elektricheskikh poley novogo pokoleniya* [Dual spherical intensity sensors for new generation low-frequency electric fields]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67. EDN: AVJDSB. (In Russ.).

8. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Сдвоенный сферический датчик напряженности электрического поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 5. С. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012. EDN: DZPPSE.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Sdvoynnyy sfericheskiy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya* [Dual spherical electric field voltage sensor]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2021. Vol. 17, no. 5. P. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012. EDN: DZPPSE. (In Russ.).

9. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Датчики напряженности электрического поля сдвоенного типа повышенной точности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 2. С. 86–93. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.2.012. EDN: TZSZFN.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Datchiki napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoynnogo tipa povyshennoy tochnosti* [Dual type of electric field sensors of increased accuracy]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2022. Vol. 18, no. 2. P. 86–93. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.2.012. EDN: TZSZFN. (In Russ.).

10. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Исследование сдвоенного сферического датчика напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 5. С. 113–123. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.5.015. EDN: IHMMCU.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Issledovaniye sdvoynnogo sfericheskogo datchika napryazhennosti elektricheskogo polya s sostavnymi chuvstvitel'nymi elementami* [Investigation of a dual spherical electric field strength sensor with composite sensitive elements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2022. Vol. 18, no. 5. P. 113–123. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.5.015. EDN: IHMMCU. (In Russ.).

11. Бирюков С. В. Двухкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ.

Biryukov S. V. *Dvukhkomponentnyy sfericheskiy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoynnogo tipa* [Two-component spherical dual-type electric field strength sensor]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2025.

No. 1 (193). P. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ. (In Russ.).

12. Бирюков С. В. Сравнительное исследование двойного и сдвоенного электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2024. № 3. (191). С. 125–132. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132. EDN: IXQSUI.

Biryukov S. V. *Sravnitel'noye issledovaniye dvoynogo i sdvoynnogo elektroinduktsionnykh sfericheskikh datchikov napryazhennosti elektricheskogo polya* [Comparative study of double and dual electroinduction spherical electric field strength sensors]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 3. (191). P. 125–132. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132. EDN: IXQSUI. (In Russ.).

13. Бирюков С. В., Тюкина Л. В. Модернизированный метод измерения напряженности электрического поля по среднему значению сдвоенными датчиками и устройства для его реализации // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 3 (179). С. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVM DJ.

Biryukov S. V., Tyukina L. V. *Modernizirovannyy metod izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya po srednemu znacheniyu sdvoynnymi datchikami i ustroystva dlya ego realizatsii* [An upgraded method for measuring the electric field strength by the average value of dual sensors and devices for its implementation]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 3 (179). P. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVM DJ. (In Russ.).

14. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 301 с. ISBN 5-283-04375-4.

Gutnikov V. S. *Integral'naya elektronika v izmeritel'nykh ustroystvakh* [Integrated electronics in measuring devices]. Leningrad, 1988. 301 p. ISBN 5-283-04375-4. (In Russ.).

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025; принята к публикации 14.07.2025.

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 23.03.2025; approved after reviewing 10.07.2025; accepted for publication 14.07.2025.

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Л. Р. Григорьян¹, Н. М. Богатов¹, Р. Л. Григорьян²

¹Кубанский государственный университет, г. Краснодар
²ООО Научно-производственная фирма «Мезон», г. Краснодар

В работе проанализированы основные параметры фазоизмерительной аппаратуры, характеризующие предельную точность фазовых методов измерения:

- основная погрешность при равных уровнях исследуемых сигналов;
- амплитудно-фазовая погрешность при неравных уровнях исследуемых сигналов.

Аппаратурным метрологическим обеспечением при определении данных составляющих погрешностей являются:

— разработанный микроконтроллерный двухфазный калибратор фазы на базе DDS-генераторов, точность задания фазовых сдвигов которого в частотном диапазоне до 1 МГц составляет сотые доли градуса;

— калиброванный аттенюатор Д2-31 с фиксированными значениями ослабления в 10 дБ, собственная фазовая погрешность которого на частоте 1 МГц не превышает 0,03°.

Приведенные характеристики аппаратуры метрологической аттестации в целом свидетельствуют о возможности обеспечения нормативно-заданных параметров фазоизмерительной аппаратуры.

Ключевые слова: измерение, фазовые методы, частота, погрешность, точность, проверка.

Для цитирования: Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Методы и аппаратура метрологической аттестации фазоизмерительной техники // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 111–117. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-111-117. EDN: XFLFCI.



© Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODS AND EQUIPMENT FOR METROLOGICAL CERTIFICATION OF PHASE-MEASURING EQUIPMENT

L. R. Grigoryan¹, N. M. Bogatov¹, R. L. Grigoryan²

¹Kuban State University, Krasnodar, Russia
²LLC Scientific and Production Firm "Mezon", Krasnodar, Russia

The paper analyzes the main components characterizing the accuracy of phase measurement methods:

- basic error, at equal levels of the signals under study;
- amplitude-phase error at unequal levels of the signals under study.

The hardware for determining these error components is:

— a developed microcontroller two-phase phase calibrator based on DDS generators, the accuracy of setting phase shifts of which in the frequency range of up to 1 MHz is hundredths of a degree;

— a calibrated attenuator D2-31 with fixed attenuation values of 10 dB, providing a phase error at a frequency of 1 MHz of no more than 0,03°.

Keywords: measurement, phase methods, frequency, error, accuracy, verification.

For citation: Grigoryan L. R., Bogatov N. M., Grigoryan R. L. Methods and equipment for metrological certification of phase-measuring equipment. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 111–117. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-111-117. EDN: XFLFCI.



© Grigoryan L. R., Bogatov N. M., Grigoryan R. L., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

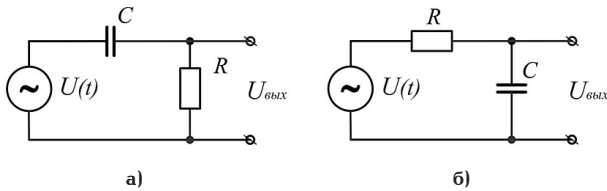


Рис. 1. Принципиальные схемы дифференцирующей (а) и интегрирующей (б) RC цепочки
 Fig. 1. Schematic scheme of differentiating (а) and integrating (б) RC circuits

Введение

Понятие фазы, как определение, характеризует состояние колебательного процесса в заданный момент времени. Применимо к гармоническим колебаниям $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, где аргумент $(\omega t + \varphi)$ является математической фазой.

В измерительном аспекте кроме фазы $(\omega t + \varphi)$ вводятся понятия угловой частоты ω и максимальной амплитуды U_m гармонического сигнала [1–3].

Определив параметры гармонического сигнала, можно приступить к количественной их оценке. При этом надо заметить, что наиболее сложной процедурой по сравнению с измерениями амплитудных и частотных параметров является оценка фазового параметра [4]. Объясняется это тем, что фаза является «внутренним» параметром, как бы замаскированным амплитудой и частотой исследуемого сигнала [5].

При метрологической аттестации фазоизмерительной техники различают фазовую погрешность при равных и неравных уровнях исследуемых сигналов.

В первом случае погрешность обозначают как основную, а во втором — как амплитудно-фазовую. Соответственно, аппаратным обеспечением оценки данных фазовых составляющих погрешностей являются:

- калибраторы фазы, точность задания фазового сдвига которых определяет в целом основную фазовую погрешность;
- аттенуатор, собственная фазовая погрешность которого обеспечивает необходимую точность оценки амплитудно-фазовой погрешности фазоизмерительной аппаратуры.

Определив цель и содержание данной работы, последующий анализ проведем отдельно для двух обозначенных составляющих погрешностей.

1. Измерение основной погрешности при аттестации фазоизмерительной техники осуществляется, как правило, с использованием образцовых мер фазового сдвига. Некоторым исключением является метод самопроверки с использованием неградуированных фазовращателей. В дальнейшем этот метод исследовался в работе [6] и в настоящее время практически не используется.

Впервые применение образцовых мер фазового сдвига было предложено в работе [7] при создании фазового сдвига на калиброванной частоте с использованием фазовращателя, состоящего из отдельных радиоэлектронных компонентов (конденсаторов и резисторов).

Однако вследствие жестких требований, предъявляемых к стабильности частоты сигнала и к элементам фазосдвигающей цепочки, данный способ проверки не получил распространения.

Более перспективным направлением следует признать применение RC-элементов при использо-

вании свойства инвариантности в дифференцирующем и интегрирующем режимах их применения [8].

Коэффициенты передачи K_A , K_H и фазовые сдвиги дифференцирующей и интегрирующей RC-цепочки (рис. 1) определяются выражениями [9]:

$$K_A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}}, \quad \varphi_A = \arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right), \quad (1)$$

$$K_H = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \varphi_H = -\arctg(\omega RC). \quad (2)$$

Используя соотношение

$$\arctg(\tau) - \arctg\left(\frac{1}{\tau}\right) = 90^\circ, \quad (3)$$

запишем: $\varphi_A - \varphi_H = 90^\circ$.

При $\omega_0 = 1/RC$ коэффициенты передачи цепочек одинаковы, а создаваемые ими фазовые сдвиги равны по модулю:

$$K_A(\omega_0) = K_H(\omega_0) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \varphi_A(\omega_0) = |\varphi_H(\omega_0)| = 45^\circ. \quad (4)$$

В работе [9] приведены структурные схемы и рассмотрены основные составляющие погрешности предлагаемого способа проверки аппаратуры.

Ограничения данного метода очевидны, но по сравнению с методом самопроверки его применение позволило оценить реальную погрешность серийно выпускаемых фазометров Ф2-16, Ф2-17 при фиксированном эталонном фазовом сдвиге 90° .

Задача метрологического обеспечения фазоизмерительной аппаратуры в полном объеме успешно была решена только при создании калибраторов фазы на основе разработанных двухфазных генераторов [10–12].

Началом развития этого направления следует считать работу [13], в которой изложены базовые принципы реализации структуры цифрового двухфазового генератора синусоидальных сигналов.

Дальнейшим развитием этого направления следует считать структуру [14], в которой решена задача радикального повышения точности задания фазового сдвига выходного напряжения регулируемого канала относительно опорного.

Практической реализацией данного направления является серийно выпускаемый калибратор фазы Ф1-4, предназначенный для воспроизведения углов фазового сдвига между двумя гармоническими сигналами в диапазоне частот от 5 Гц до 10 МГц и с точностью в пределах сотых долей градуса [15].

Существенным недостатком рассматриваемых структур калибраторов фазы является их реализация на основе применения цифровых элементов жесткой логики [16].

Дальнейшее развитие этого направления стало возможным с развитием микроэлектроники и появлением сверхбольших интегральных схем в широком номенклатурном диапазоне [17], что позволило оптимизировать структуру цифровых двухфазных генераторов [18, 19]. Одним из направлений этой оптимизации является применение ортогональных фазовых структур как в части воспроизведения

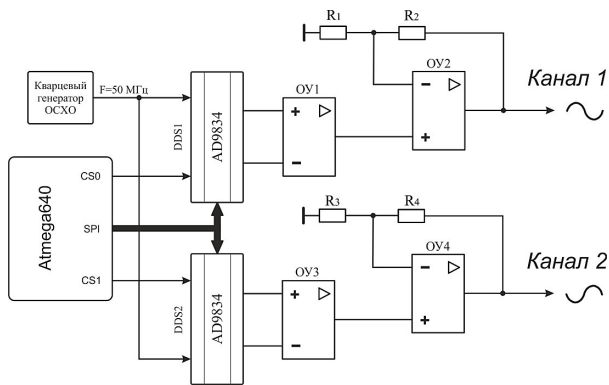


Рис. 2. Функциональная схема двухфазного генератора
Fig. 2. Functional scheme of a two-phase generator

фазовых сдвигов, так и измерения разности фаз между двумя гармоническими сигналами в широком частотном диапазоне [20, 21].

Применимо к рассматриваемой задаче анализа основной погрешности фазоизмерителей техники на рис. 2 представлена функциональная схема двухканального генератора с регулируемым фазовым сдвигом между каналами.

Отличительными особенностями представленной схемы являются:

- применение двух DDS-генераторов AD9834 [22] в качестве задающего двухканального источника сигналов;
- синхронизация обоих DDS-генераторов от одного высокостабильного кварцевого источника сигналов ОСХО;
- использование общего источника питания $\pm U$ для обоих DDS-генераторов;
- синхронизация от единого микроконтроллера ATmega640;
- симметричность и идентичность схмотехники выходных каналов двухфазного генератора, построенных на прецизионных операционных усилителях AD8032 и AD8031.

Экспериментальная проверка данного источника калиброванных фазовых сдвигов подтвердила следующие его технические характеристики:

- частотный диапазон сигналов от 10 Гц до 10 МГц;
- динамический диапазон выходного сигнала ± 2 В;
- разрешающая способность воспроизведения фазовых сдвигов $\pm 0,01^\circ$.

Из анализа приведенных характеристик следует возможность его использования при проверке основной погрешности фазометров класса $0,1^\circ$ в диапазоне частот до 10 МГц.

2. Рассмотрим далее аппаратные методы оценки фазоамплитудной погрешности фазоизмерительной техники.

Фазоамплитудную погрешность определяют методом «аттенюатора» путем сличения фазоамплитудной характеристики каждого канала поверяемого прибора с фазоамплитудной характеристикой образцового аттенюатора, в качестве которого используется набор до семи штук последовательно соединенных аттенюаторов типа Д2-31. Фазоамплитудную погрешность определяют отдельно для каждого канала прибора по структурной схеме проверки, приведенной на рис. 3.

Измерение проводят на нижней, средней и верхней частотах с использованием генератора Г4-164

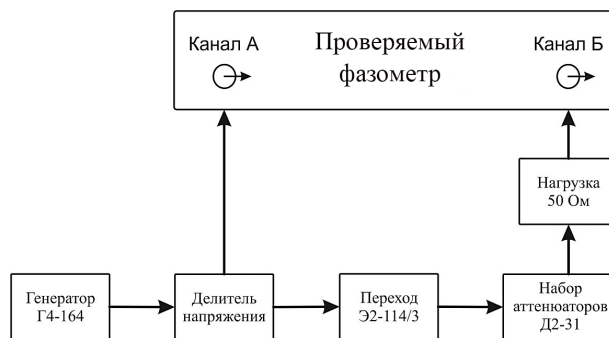


Рис. 3. Структурная схема проверки фазоамплитудной погрешности
Fig. 3. Structural scheme of phase-amplitude error verification

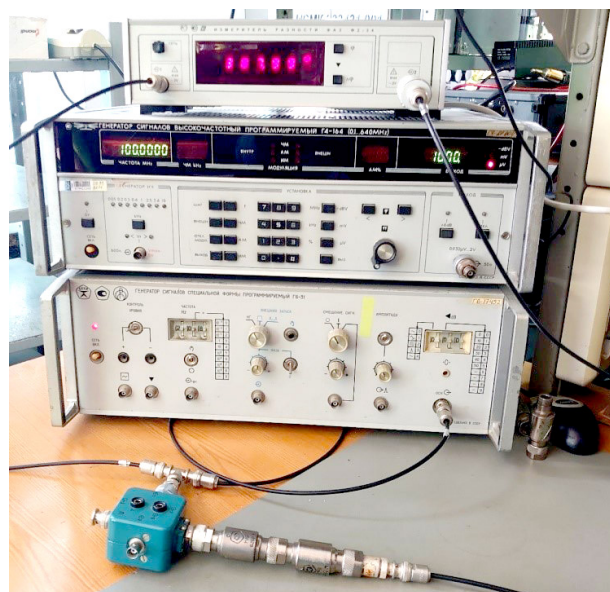


Рис. 4. Используемые приборы при измерении фазоамплитудной погрешности
Fig. 4. Devices used to measure phase-amplitude error

и набора аттенюаторов Д2-31 с фиксацией показаний поверяемого прибора Φ (рис. 4) и оценки его фазоамплитудной погрешности по формуле (5):

$$\Delta\varphi = \Phi \pm a, \quad (5)$$

где a — фазовый сдвиг, вносимый аттенюаторами Д2-31.

При этом экспериментальные исследования серийно-выпускаемых фазометров Ф2-34 показывают, что фазоамплитудная погрешность исследуемых приборов нелинейно зависит от величины ослабления сигнала. Например, значение погрешности при ослаблении на 60 дБ может быть сравнима со значением погрешности при меньших ослаблениях сигнала. Для устранения этого эффекта проверку необходимо производить последовательно при ослаблениях 10, 20, 30, 40, 50 и 60 дБ.

При определении фазоамплитудной погрешности методом «аттенюатора» возникает погрешность рассогласования $\Delta\varphi_p$, обусловленная влиянием емкости каналов фазометра. Для исключения этого эффекта в схему проверки погрешности фазометра введены развязывающие аттенюаторы с общим ослаблением 16 дБ.

Таблица 1. Фазовый сдвиг аттенюаторов Д2-31
Table 1. Phase shift of attenuators D2-31

№ аттенюатора	Ослабление аттенюатора, дБ	Фазовый сдвиг, φ' , °	$\varphi_i - \varphi_{ср}$, °
9586	9,98	9,0	-0,15
38036	10,07	9,0	-0,15
38085	10,16	9,2	+0,05
9594	10,07	9,1	-0,05
38026	10,02	9,4	+0,25
16749	10,1	9,1	-0,05
38096	10,07	9,1	-0,05
38077	10,11	9,3	+0,15
38035	10,13	9,2	+0,05

При входной емкости не более 30 пФ применение развязывающих аттенюаторов уменьшает ее влияние до значений $\Delta\varphi_p = 0,15^\circ$ на частотах 10 МГц и $\Delta\varphi_p = 0,015^\circ$ на частоте 1 МГц.

Рассмотрим далее влияние на точность поверки аттенюаторов Д2-31, которые представляют собой широкополосные резистивные аттенюаторы с полосой рабочих частот от 0 до 2 ГГц [23].

При этом фазовый сдвиг вносимый данными аттенюаторами на частотах до 100 МГц прямо пропорционален частоте сигнала и определяется его электрической длиной и фазоамплитудной погрешностью резистивного делителя, которая пренебрежительно мала [24]. В табл. 1 приведены результаты исследования фазовых параметров заводской партии аттенюаторов Д2-31 в количестве 9 штук на частоте 100 МГц с использованием установок для проверки аттенюаторов ДК1-12, выполненных Нижегородским научно-исследовательским приборостроительным институтом. Из анализа данных табл. 1 следует, что фазовый сдвиг аттенюаторов Д2-31 на частоте 100 МГц находится в пределах $\varphi' = (9,2 \pm 0,3)^\circ$.

Учитывая, что собственная погрешность установки ДК1-12 на частоте 100 МГц минимальна и не превышает $\Delta\varphi_{уст} = \pm 1^\circ$, результирующее значение фазового сдвига аттенюатора на частоте 100 МГц определяется величиной $\Delta\varphi = (9,2 \pm 1,3)^\circ$.

С учетом изложенного погрешность задания фазовых сдвигов с использованием аттенюаторов Д2-31 определяется выражением:

$$\Delta\varphi_{ам} = \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_f \cdot n,$$

где $\Delta\varphi_p$ — погрешность рассогласования за счет $C_{вх}$ фазометра; $\Delta\varphi_f$ — погрешность определения фазового сдвига аттенюатора на частоте f ; n — число аттенюаторов.

Тогда погрешности $\Delta\varphi_{ам}$ при ослаблении 10, 20, 30, 40, 50 и 60 дБ на частоте 10 МГц будут равны $\pm 0,27^\circ, \pm 0,39^\circ, \pm 0,51^\circ, \pm 0,63^\circ, \pm 0,75^\circ, \pm 0,87^\circ$, а на частоте 1 МГц равны $\pm 0,03^\circ, \pm 0,04^\circ, \pm 0,05^\circ, \pm 0,06^\circ, \pm 0,075^\circ, \pm 0,09^\circ$. Учитывая, что значение погрешности задания фазового сдвига с помощью аттенюаторов Д2-31 не превышает 20 % от нормируемой фазоамплитудной погрешности прибора, использование аттенюаторов Д2-31 в качестве образцовой меры при определении фазоамплитудной погрешности допустимо.

3. Экспериментальная проверка рассматриваемых аппаратурных методов метрологической аттестации фазометров была проведена при поверке

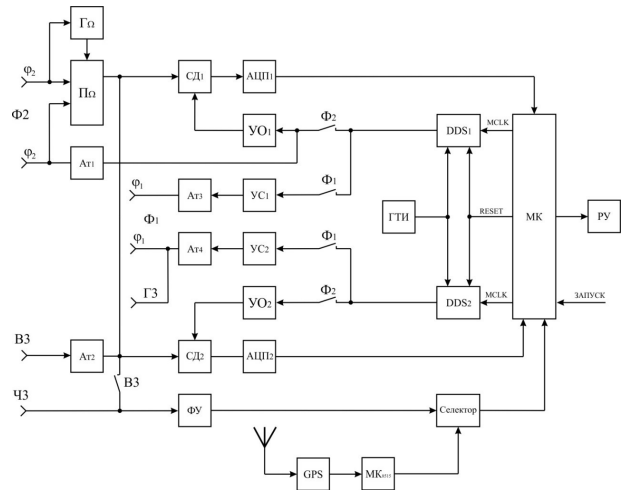


Рис. 5. Структурная схема универсального анализатора параметров сигналов
Fig. 5. Structural scheme of the universal signal parameter analyzer



Рис. 6. Анализатор параметров сигналов АПС-01
Fig. 6. Signal parameter analyzer APS-01

серийно выпускаемых фазометров Ф2-34 в количестве трех штук (приборов). Основной вывод из проведенной метрологической аттестации заключается в том, что измеренные значения как основной, так амплитудно-фазовой погрешности соответствуют паспортным значениям проверяемой партии приборов Ф2-34, что означает корректность предложенных как методов, так и аппаратуры метрологической аттестации фазоизмерительной техники.

При детальном рассмотрении структуры двухканального фазового генератора можно заметить, что он содержит как элементы генерации сигналов (DDS-генераторы), так и программно-вычислительный элемент (микроконтроллер) с регистрирующим устройством для визуализации управленческих функций, что открывает при дополнении его структуры элементами измерения параметров сигналов (синхронными детекторами) возможности создания универсального измерительного прибора с набором измерительных функций востребованных при метрологической оценке параметров фазовой аппаратуры [25, 26].

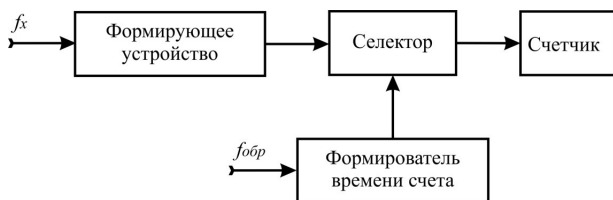


Рис. 7. Схема измерения частоты
Fig. 7. Frequency measurement scheme

Концепция предлагаемого универсального измерительного прибора включает [27]:

- в режиме генерации сигналов генераторы группы ГЗ и фазовые калибраторы группы Ф1;
- в режиме измерения параметров сигналов фазометры группы Ф2, вольтметры группы ВЗ и частотомеры группы ЧЗ.

Структурная схема универсального измерительного прибора и внешний вид опытного образца приведены на рис. 5 и на рис. 6 соответственно.

Из анализа структурной схемы прибора следует, что основными измерительными его блоками являются:

- генераторный блок, структурная схема которого приведена на рис. 2;
- измерительный блок, построенный по схеме ортогонального оптимального приемника сигналов на основе синхронных детекторов [26];
- блок измерения частоты, структурная схема которого приведена на рис. 7.

Функциональная схема генераторного блока приведена на рис. 2 и рассмотрена при анализе его применения для проверки основных погрешностей фазометра.

Отличительной особенностью измерительного блока является реализация ортогонального преобразования сигналов на базе двух ключевых синхронных детекторов и 24 разрядного сигма-дельта АЦП. Выходы аналого-цифровых преобразователей подключены к микроконтроллеру, а входы усилителей-ограничителей — к выходам синтезаторов DDS. Такая реализация ортогонального преобразования обеспечивает исключение методической погрешности измерения фазы сигнала при соответствующем тактовом алгоритме измерения.

Отличительным признаком блока измерения частоты, реализованного по методу сравнения измеряемой частоты f_x с известной образцовой частотой $f_{обр}$, является применение в качестве образцовых сигналов 1 PPS спутниковой Глонавс/GPS системы. Данный сигнал поступает на вход формирователя времени счета, на выходе которого формируется интервал времени Δt , устанавливаемый равным 10^m , где m — целое число, принимающее значение от 2 до -3 .

Сигнал измеряемой частоты f_x поступает на формирующее устройство, преобразующее данный сигнал в последовательность импульсов. С выхода формирующего устройства импульсы поступают на временной селектор, на второй вход которого поступает сигнал заданного временного интервала Δt . Подсчет импульсов, попадающих в интервал Δt , осуществляется цифровым устройством по формуле $n = \Delta t \cdot f_x$, из которой определяется значение частоты f_x .

В заключение отметим, что взаимодействие приведенных электронных блоков осуществляет-

ся через коммутационные элементы, управляемые в свою очередь сигналами с программно-вычислительного блока (микроконтроллера).

Заключение

Проведенный анализ как существующих, так и перспективных решений, используемых в практике метрологической аттестации фазоизмерительной аппаратуры, позволил сформулировать следующие основные выводы и положения:

1. Точность фазоизмерительной аппаратуры характеризуется двумя составляющими погрешностями:

- основной, при равных уровнях исследуемых сигналов;
- амплитудно-фазовой при неравных уровнях исследуемых сигналов.

2. Аппаратурным обеспечением при определении данных составляющих погрешностей являются:

- двухфазные генераторы с калиброванным фазовым сдвигом между выходными сигналами;
- калиброванные аттенюаторы Д2-31 с фиксированным значением ослабления 10 дБ.

3. В качестве калибратора фазы авторами предложено использовать разработанный микроконтроллерный двухфазный генератор на базе DDS-генераторов AD9834, точность задания фазовых сдвигов которых в частотном диапазоне до 1 МГц составляет сотые доли градуса.

4. Аттестация аттенюаторов Д2-31 с использованием установки ДК1-12 обеспечивает фазовую точность на частоте 1 МГц, не превышающую $0,03^\circ$, что вполне достаточно при оценке амплитудно-фазовой погрешности серийно выпускаемых фазометров Ф2-34.

5. Предложенная авторами структура двухканального генератора сигналов открывает возможности создания универсального измерительного прибора с широким набором измерительных функций.

Список источников / References

1. Галахова Ф. П., Колтик Е. Д., Кравченко С. А. Основы фазометрии. Ленинград: Энергия, 1976. 256 с.
Galakhova F. P., Koltik E. D., Kravchenko S. A. Osnovy fazometrii [Fundamentals of phase measurement]. Leningrad, 1976. 256 p. (In Russ.).
2. Огородничук Л. Д. Классификация методов фазометрии диапазонов высоких частот // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2007. Т. 50, № 12. С. 49–65. EDN: KUZFYF.
Ogorodnichuk L. D. Klassifikatsiya metodov fazometrii diapazonov vysokikh chastot [Classification of phase measurement methods of high frequency ranges]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika. 2007. Vol. 50, no. 12. P. 49–65. EDN: KUZFYF. (In Russ.).
3. Патюков В. Г. Основы частотно-временных измерений: моногр. Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. 166 с. ISBN 978-5-7638-3136-8.
Patyukov V. G. Osnovy chastotno-vremennykh izmereniy [Fundamentals of time-frequency measurements]. Krasnoyarsk, 2014. 166 p. ISBN 978-5-7638-3136-8. (In Russ.).
4. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Чураков А. И. Средства электрических измерений и их поверка. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 316 с.
Kim K. K., Anisimov G. N., Churakov A. I. Sredstva elektricheskikh izmereniy i ikh poverka [Electrical measuring instruments and their verification]. Saint Petersburg, 2021. 316 p. (In Russ.).

5. Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф. Эталоны и стандартные образцы в измерительной технике. Москва: Техносфера, 2018. 402 с. ISBN 978-5-94836-512-1.

Lukashkin V. G., Bulatov M. F. Etalony i standartnyye obraztsy v izmeritel'noy tekhnike [Standards and standard samples in measuring technology]. Moscow, 2018. 402 p. ISBN 978-5-94836-512-1. (In Russ.).

6. Поздняков И. К. Разработка и исследование методов и образцовой аппаратуры для измерения угла сдвига фаз: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1963. 134 с.

Pozdnyakov I. K. Razrabotka i issledovaniye metodov i obraztsovoy apparatury dlya izmereniya ugla sdviga faz [Development and research of methods and exemplary equipment for measuring the phase shift angle]. Leningrad, 1963. 134 p. (In Russ.).

7. Смирнов П. Т. Образцовый фазовращатель для поверки электронных фазометров КФ-1 (Ф2-1) // Измерительная техника. 1974. Вып. 4.

Smirnov P. T. Obraztsovyu fazovrashchatel' dlya poverki elektronnykh fazometrov KF-1 (F2-1) [Model phase shifter for testing electronic phase meters KF-1 (F2-1)]. *Izmeritel'naya tekhnika. Measurement Techniques*. 1974. Issue 4. (In Russ.).

8. А. с. 600473 СССР, МПК G01R25/00. Способ оценки погрешности измерителей разности фаз / Э. В. Маграчев, Р. Л. Григорьян, В. Г. Нудьга; заявл. 26.03.1976; опубл. 06.12.1977, Бюл. № 12.

A. s. 600473 SSSR, IPC G01R25/00. Sposob otsenki pogreshnosti izmeriteley raznosti faz [Method of evaluating errors of phase difference meters] / E. V. Magrachev, R. L. Grigoryan, V. G. Nudga. (In Russ.).

9. Григорьян Р. Л., Маграчев Э. В., Нудьга В. Г. Способ оценки погрешности фазометров с помощью неаттестованных фазосдвигающих мер // Техника средств связи. Серия: Радиоизмерительная техника. 1976. Вып. 6. С. 1–10.

Grigor'yan R. L., Magrachev Z. V., Nud'ga V. G. Sposob otsenki pogreshnosti fazometrov s pomoshch'yu neattestovannykh fazosdvigayushchikh mer [Method for estimating the error of phasometers using untested phase-shifting measures]. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya: Radioizmeritel'naya tekhnika*. 1976. Issue 6. P. 1–10. (In Russ.).

10. Вязигин И. О. Расчет статистических параметров погрешности алгоритма измерения угла сдвига фаз // Вопросы радиоэлектроники. 2008. Т. 1, № 2. С. 103–110. EDN: NXXUEV.

Vyazigin I. O. Raschet statisticheskikh parametrov pogreshnosti algoritma izmereniya ugla sdviga faz [Calculation of statistical error parameters of the phase shift angle measurement algorithm]. *Voprosy radioelektroniki. Questions of Radio Electronics*. 2008. Vol. 1, no. 2. P. 103–110. EDN: NXXUEV. (In Russ.).

11. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Москва: Солон-Пресс, 2021. 540 с. ISBN 978-5-91359-250-7.

Afonskiy A. A., Dyakonov V. P. Izmeritel'nyye pribory i massovyye elektronnyye izmereniya [Measuring instruments and mass electronic measurements]. Moscow, 2021. 540 p. ISBN 978-5-91359-250-7. (In Russ.).

12. Баженов Н. Р., Мыльников А. В., Малай И. М. Новые задачи метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 23–36. EDN: WIOCAT.

Vazhenov N. R., Mylnikov A. V., Malay I. M. Novyye zadachi metrologicheskogo obespecheniya izmereniy parametrov radiotekhnicheskikh signalov [New tasks of metrological assurance of measurements of parameters of radiotechnical signals]. *Al'manakh sovremennoy metrologii. Almanac of Modern Metrology*. 2019. No. 2 (18). P. 23–36. EDN: WIOCAT. (In Russ.).

13. Асеев Б. П. Фазовые соотношения в радиотехнике. 3-е изд., доп. Москва: Связьиздат, 1959. 304 с.

Assev B. P. Fazovyye sootnosheniya v radiotekhnike [Phase relations in radio engineering]. 3rd ed., suppl. Moscow, 1959. 304 p. (In Russ.).

14. А. с. 599335 СССР, МПК H03K3/80. Цифровой двухфазный генератор синусоидальных сигналов / Р. Л. Григорьян, Н. В. Маслов, О. К. Шалдыкин; заявл. 14.12.1976; опубл. 28.11.1977, Бюл. № 11.

A. s. 599335 SSSR, IPC H 03 K 3/80. Tsifrovoy dvukhfaznyy generator sinusoidal'nykh signalov [Digital two-phase sinusoidal signal generator] / R. L. Grigoryan, N. V. Maslov, O. K. Shaldykin. (In Russ.).

15. А. с. 1525614 СССР, МПК G01R25/04. Широкополосный калибратор фазовых сдвигов / Р. Л. Григорьян, В. Ф. Егоров, С. В. Федорченко; заявл. 15.12.1987; опубл. 01.08.1989, Бюл. № 44.

A. s. 1525614 SSSR, MPK G01R25/04. Shirokopolosnyy kalibrator fazovykh sdvigo [Broadband phase shift calibrator] / R. L. Grigoryan, V. F. Egorov, S. V. Fedorchenko. (In Russ.).

16. Калибратор фазы Ф1-4. ХВ2.085.010 ТУ. Краснодар, 1980. 312 с.

Kalibrator fazy F1-4 [Phase calibrator F1-4]. ХВ2.085.010 ТУ. Krasnodar, 1980. 312 p. (In Russ.).

17. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. Москва: Постмаркет, 2000. 352 с. ISBN 5-901095-02-2.

Klaassen K. B. Osnovy izmereniy. Elektronnyye metody i pribory v izmeritel'noy tekhnike [Fundamentals of measurement. Electronic methods and devices in measuring technology] / trans. from Engl. E. V. Voronov, A. L. Larin. Moscow, 2000. 352 p. ISBN 5-901095-02-2. (In Russ.).

18. Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Павленко Е. В. Анализ погрешности средства измерения параметров гармонических сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. 2015. № 1 (9). С. 67–71. EDN: TPEXSZ.

Melentyev V. S., Ivanov Yu. M., Pavlenko E. V. Analiz pogreshnosti sredstva izmereniya parametrov garmonicheskikh signalov [Analysis of error of measuring the harmonic signals parameters]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. South-Siberian Scientific Bulletin*. 2015. No. 1 (9). P. 67–71. EDN: TPEXSZ. (In Russ.).

19. Боровский А. С., Булатов В. Н., Соловьев Н. А. Спектрально-дискретный метод воспроизведения фазы колебаний // Датчики и системы. 2016. № 12 (209). С. 21–26. EDN: XHFJUZ.

Borovskiy A. S., Bulatov V. N., Solovyev N. A. Spektрал'no-diskretnyy metod vosproizvedeniya fazy kolebaniy [Spectral-discrete method of reproducing phase fluctuations]. *Datchiki i sistemy. Sensors and Systems*. 2016. No. 12 (209). P. 21–26. EDN: XHFJUZ. (In Russ.).

20. Азаркин Д. Г., Бахтин В. Н., Бычков Н. В. [и др.]. Три метода независимой поверки измерителей ослабления и фазового сдвига на промежуточной частоте // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 41–43. EDN: MVJXTF.

Azarkin D. G., Bakhtin V. N., Bychkov N. V. [et al.]. Tri metoda nezavisimoy poverki izmeriteley oslableniya i fazovogo sdviga na promezhutochnoy chastote [Three methods for independently checking instruments for measuring attenuation and phase shift at an intermediate frequency]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2008. No. 12. P. 41–43. EDN: MVJXTF. (In Russ.).

21. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О. Проектирование электронных измерительных приборов. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 240 с. ISBN 978-5-9729-1518-7.

Bondar O. G., Brezhneva E. O. Proyektirovaniye elektronnykh izmeritel'nykh priborov [Design of electronic measuring instruments]. Moscow, 2023. 240 s. ISBN 978-5-9729-1518-7. (In Russ.).

22. Direct Digital Synthesis (DDS). *Analog Device*. URL: <https://www.analog.com/en/dds/index.html> (accessed: 20.03.2025).

23. Д2-31 – аттенуатор резистивный фиксированный 10 Дб. ТУ: ЕЭ0.224.066. Великие Луки, 1972. 7 с.

D2-31 – attenuator rezistivnyy fiksirovanny 10 Db. [D2-31 – fixed resistive attenuator 10 dB]. TU: EE0.224.066. Velikiye Luki, 1972. 7 p. (In Russ.).

24. МИ 1672-87. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Фазометры электронные. Методика поверки. Введ. 1988-07-01. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 33 с.

MI 1672-87. Metodicheskiye ukazaniya. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Fazometry elektronnyye. Metodika poverki [MI 1672-87. Methodical instructions. State system for ensuring uniformity of measurements. Electronic phase meters. Verification procedure.]. Moscow, 1988. 33 p. (In Russ.).

25. Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Новые схемотехнические решения в практике коммутационных фазовых измерений // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2021: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 307–310 с. EDN: QUFGKP.

Grigor'yan L. R., Bogatov N. M., Grigor'yan R. L. Novyye skhemotekhnicheskiye resheniya v praktike kommutatsionnykh fazovykh izmereniy [New schematical solutions in the practice of commutation phase measurements]. Perspektivnyye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii – PTSPI'2021. *Perspective Technology in Means of Information Transfer – PTMIT-2021*. Vladimir, 2021. 307–310 p. EDN: QUFGKP. (In Russ.).

26. Земцов А. Н. Об эффективности разложения сигналов с помощью ортогональных преобразований // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2012. № 2-2. С. 129–135.

Zemtsov A. N. Ob effektivnosti razlozheniya signalov s pomoshch'yu ortogonal'nykh preobrazovaniy [On the efficiency of signal decomposition using orthogonal transformations]. Informatsionnyye tekhnologii. Radioelektronika. Telekomunikatsii. *Information Technology. Radio Electronics. Telecommunications*. 2012. No. 2-2. P. 129–135. (In Russ.).

27. Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Аппаратурная реализация фазовых анализаторов с ортогональным преобразованием сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2022. № 4. С. 21–28. EDN: WONBKS.

Grigoryan L. R., Bogatov N. M., Grigoryan R. L. Apparaturnaya realizatsiya fazovykh analizatorov s ortogonal'nyim preobrazovaniyem signalov [Hardware implementation of phase analyzers with orthogonal signal conversion]. Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv. *Design and Technology of Electronic Means*. 2022. No. 4. P. 21–28. EDN: WONBKS. (In Russ.).

ГРИГОРЬЯН Леонтий Рустемович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и информационные системы» Кубанского государственного университета (КубГУ), г. Краснодар.
SPIN-код: 5577-2862
AuthorID (РИНЦ): 303618

AuthorID (SCOPUS): 56108945200

Адрес для переписки: leonmezon@mail.ru

БОГАТОВ Николай Маркович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Физика и информационные системы» КубГУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 3221-6389

AuthorID (РИНЦ): 18064

ORCID: 0000-0002-9301-4545

AuthorID (SCOPUS): 6603914657

ResearcherID: P-7314-2015

Адрес для переписки: bogatov@phys.kubsu.ru

ГРИГОРЬЯН Рустем Леонтьевич, кандидат технических наук, исполнительный директор, ООО Научно-производственная фирма «Мезон», г. Краснодар.

Адрес для переписки: mezon_kub@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; одобрена после рецензирования 09.06.2025; принята к публикации 27.06.2025.

GRIGORYAN Leonty Rustemovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Physics and Information Systems Department, Kuban State University (KubSU), Krasnodar.

SPIN-code: 5577-2862

AuthorID (RSCI): 303618

AuthorID (SCOPUS): 56108945200

Correspondence address: leonmezon@mail.ru

BOGATOV Nikolay Markovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Physics and Information Systems Department, KubSU, Krasnodar.

SPIN-code: 3221-6389

AuthorID (RSCI): 18064

ORCID: 0000-0002-9301-4545

AuthorID (SCOPUS): 6603914657

ResearcherID: P-7314-2015

Correspondence address: bogatov@phys.kubsu.ru

GRIGORYAN Rustem Leontievich, Candidate of Technical Sciences, Executive Director, LLC Scientific and Production Company "Mezon", Krasnodar.

Correspondence address: mezon_kub@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 18.04.2025; approved after reviewing 09.06.2025; accepted for publication 27.06.2025.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛА С БИНАРНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ АДАПТИВНОМ ИЗМЕНЕНИИ КОНФИГУРАЦИИ ГРАНИЦ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В КАНАЛЕ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ

Г. М. Сидельников

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

Рассматриваются возможности когерентного демодулятора бинарных сигналов с фазовой модуляцией в канале с многолучевостью при адаптивном вращении сигнального созвездия сигналов. Определен угол поворота, который увеличивает сигнальное расстояние в зависимости от информационного потока модулированного сигнала. Помехоустойчивость приема определялась на основе статистических функций распределения сигнальных расстояний, полученных с помощью математического моделирования на ЭВМ. Показано, что при вращении сигнального созвездия наибольший эффект достигается при максимальной интенсивности дополнительного луча. Получена зависимость эффективности вращения от интенсивности дополнительного луча.

Ключевые слова: сигнальное расстояние, двухлучевая модель, вращение сигнального созвездия, вероятность ошибки, бинарная фазовая модуляция, множитель сигнального расстояния, многолучевость, гауссовский шум, межсимвольная интерференция.

Для цитирования: Сидельников Г. М. Помехоустойчивость демодулятора сигнала с бинарной фазовой модуляцией при адаптивном изменении конфигурации границ принятия решения в канале с многолучевостью // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 118–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-118-124. EDN: LFBXYI.



© Сидельников Г. М., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

NOISE IMMUNITY OF A BINARY PHASE MODULATED SIGNAL DEMODULATOR WITH ADAPTIVE CONFIGURATION CHANGE OF DECISION BOUNDARIES IN A MULTIPATH CHANNEL

G. M. Sidelnikov

Siberian state university of telecommunications and information science, Novosibirsk, Russia

The article considers the possibilities of a coherent phase-modulated binary signal demodulator in a multipath channel with adaptive rotation of a signal constellation. The author determines the rotation angle, which increases the signal distance depending on the information flow of the modulated signal. Moreover, the noise immunity of reception is defined on the basis of statistical distribution functions of signal distances obtained by mathematical modeling on a computer. Therefore, when the signal constellation rotates, the greatest effect is achieved at the maximum intensity of the additional beam. As a result, the research demonstrates the dependence of the rotation efficiency on the intensity of the additional beam.

Keywords: signal distance, two-beam model, signal constellation rotation, error probability, binary phase modulation, signal distance multiplier, multipath, Gaussian noise, intersymbol interference.

For citation: Sidelnikov G. M. Noise immunity of a binary phase modulated signal demodulator with adaptive configuration change of decision boundaries in a multipath channel. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 118–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-118-124. EDN: LFBXYI.



Введение

Повышенный интерес к адаптивным методам приема сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) связан с высокой помехоустойчивостью и широким её применением в современных системах связи [1–13]. Рассматриваются различные алгоритмы повышения помехоустойчивости в каналах с переменными параметрами, а именно: адаптивный алгоритм анализа фазы [2], алгоритм Кальмана [3], фазовый алгоритм адаптивной фильтрации [4], адаптивные фильтры, основанные на использовании эквалайзеров. Исследование помехоустойчивости сигналов с многократной фазовой модуляцией при воздействии ретрансляционной помехи приведены в [5], где показано увеличение вероятности ошибки при увеличении кратности модуляции в канале с многолучевостью. Расчет тонкой структуры многолучевого поля [12] показал, что достаточно использовать двухлучевую модель канала как наиболее худшую.

Актуальность решаемой задачи связана с тем, что совершенствование радиосистем требует повышения эффективности адаптивных методов, позволяющих учесть тонкую структуру многолучевого поля. Использование аппарата векторной алгебры [13] позволяет получить статистические характеристики сигнальных расстояний в зависимости от параметров многолучевого поля, а также при изменении конфигурации границ сигнального созвездия сигналов с ФМ различной кратности.

Цель работы — определить эффективность применения адаптивного вращения границ принятия решения для сигналов с ФМ-2 в канале с предельной многолучевостью.

1. Анализ помехоустойчивости когерентного демодулятора сигналов с фазовой модуляцией в канале с многолучевостью

Проведем анализ помехоустойчивости когерентного демодулятора для приема сигналов с фазовой модуляцией в канале с многолучевостью, где дополнительный сигнал в месте приема представляет собой дополнительный сигнал, который может быть суперпозицией многих лучей [5].

Анализ моделей многолучевого поля, образованного суммированием многих лучей с разными амплитудами, задержками и фазами, показывает, что наибольшие замирания принимаемого сигнала характерны для двухлучевой модели. Вероятность глубоких замираний уменьшается при увеличении числа дополнительных лучей. Глубокие замирания характерны для задержек менее длительности посылки. Это связано с тем, что на характер замираний влияют значения информационных параметров задержанных сигналов. Кроме того, увеличение кратности модуляции ведет к уменьшению глубины замираний.

Рассмотрим двухлучевой канал связи, где в место приема приходит основной сигнал $S_j(t)$, дополнительный (задержанный) сигнал $S_{доп.}(t)$ и гауссовский шум $n(t)$ на интервале посылки длительностью T_s .

Основной сигнал

$$S_j(t) = A \cos(\omega t + \varphi_j),$$

где A — амплитуда сигнала; ω — несущая частота; φ_j — информационная фаза сигнала, равная 0 или π .
Дополнительный сигнал

$$S_{доп.}(t) = \mu A \cos(\omega(t-\tau) + \varphi_i + \varphi_{доп.}), \text{ если } 0 < t < T_s,$$

$$S_{доп.}(t) = \mu A \cos(\omega(t-\tau) + \varphi_j + \varphi_{доп.}), \text{ если } \tau < t < T_s,$$

где μ — интенсивность дополнительного сигнала; A — амплитуда сигнала; τ — задержка; $\varphi_{доп.}$ — случайная фаза; φ_j — информационный символ дополнительного символа, совпадающего с символом основного сигнала; φ_i — информационный символ соседнего символа.

Сигнал на выходе когерентного демодулятора сигналов с ФМ представляет собой свертку Y_j принимаемого сигнала $y(t)$ и M опорных сигналов [9]:

$$Y_j = \frac{2A}{N_0} \int_0^T y(t) \cos(\omega_0 t + \frac{j2\pi}{M} dt), \quad (1)$$

где $y(t) = S_j(t) + S_{доп.}(t) + n(t)$, N — спектральная плотность мощности гауссовского шума; T — предел интегрирования, совпадающий с длительностью посылки T_s ; M — кратность фазовой модуляции, равная в данном случае двум.

Сигнал на выходе демодулятора (1) является случайной величиной, при этом аддитивная флуктуационная помеха имеет гауссовское распределение вероятностей. Операции в демодуляторе все линейные, поэтому и сигнал на выходе когерентного демодулятора будет иметь нормальное распределение вероятностей. Следует отметить, что две неизвестные составляющие φ_i и $\varphi_{доп.}$ в начале рассмотрения будут считаться фиксированными величинами.

Для нормального закона распределения вероятностей необходимо определить числовые характеристики: математическое ожидание и дисперсию сигнала на выходе демодулятора.

Математическое ожидание корреляционного интеграла (1) для фазовой модуляции определяется как [4]:

$$m_0 = \frac{2E}{N_0} \left[1 + \frac{\mu\tau_3}{T} \cos(\psi + \varphi_i) + \left(1 - \frac{\mu\tau_3}{T} \right) \mu \cos(\psi) \right], \quad (2)$$

$$m_j = \frac{2E}{N_0} \left[\begin{aligned} &\cos \varphi_j + \frac{\mu\tau_3}{T} \cos(\psi + \varphi_i - \varphi_j) + \\ &+ \left(1 - \frac{\mu\tau_3}{T} \right) \mu \cos(\psi - \varphi_j) \end{aligned} \right], \quad (3)$$

где μ — интенсивность; τ_3 — задержка; $\psi = -\omega_\tau + \varphi_{доп.}$ — случайная начальная фаза дополнительного луча; φ_i, φ_j — информационные символы основного и задержанного сигналов; E — энергия сигнала.

Математическое ожидание и дисперсия сигнального расстояния [4]:

$$m_{0-j} = m_0 - m_j, \quad (4)$$

$$D_{0-j} = \frac{4E}{N_0} (1 - \cos \varphi_j). \quad (5)$$

Для бинарной фазовой модуляции индекс j заменим на π для рассмотрения деформации сигнального расстояния между сигналом с информационной фазой, равной нулю, и сигналом с информационной фазой, равной π , что соответствует бинарным сигналам.

Принимая во внимание (4) и (5), условная вероятность ошибочного приема по параметрам ψ, φ_i :

$$P_{ош} = Q \left(\frac{m_{0-\pi}(\psi, \varphi_i)}{\sqrt{D_{0-\pi}}} \right), \quad (7)$$

где $Q(x)$ — табулированный интеграл вероятностей.

Для получения безусловной вероятности ошибки необходимо выражение (7) усреднить по случайным величинам ψ и φ_i .

Следует заметить, что сигнал с выхода демодулятора поступает на решающую схему, которая принимает решение о том, какой символ был передан по разным алгоритмам [9]. В данном случае решающее устройство представляет собой схему сравнения, где выходной сигнал j -го демодулятора сравнивается с остальными сигналами других демодуляторов. Следовательно, помехоустойчивость демодулятора будет определяться сигнальными расстояниями между сравниваемыми сигналами.

Приведенные выше выражения (2) и (3) учитывают только дополнительный сигнал с задержкой в пределах тактового интервала. При задержках более длительности посылки необходимо рассматривать всевозможные комбинации интерферирующих символов.

Если для фазовой модуляции достаточно рассматривать вероятность ошибки (7) для одной посылки, то для относительной фазовой модуляции необходимо рассматривать вероятность ошибки для двух соседних посылок, что связано с тем, что сигнальные расстояния будут отличаться из-за разных интерферирующих информационных символов. Наименьшее сигнальное расстояние будет приводить к увеличению вероятности ошибки. Кроме того, при задержках более длительности посылки, разница в сигнальных расстояниях на двух соседних посылках будет увеличиваться.

Как показано в [12], для ФМ-2 влияние задержки менее критично, чем для относительной ФМ-2. Основную роль для ФМ-2 играет в первую очередь амплитуда задержанного луча, а во вторую — фаза луча.

2. Анализ сигнальных расстояний однократной фазовой модуляции в двухлучевом канале

Рассмотрим сигнальное расстояние, вызванное приходом дополнительного луча. Для этого в выражениях (2)–(4) исключим отношение сигнал–шум $\frac{2E}{N_0}$, оставив только множитель сигнального расстояния при воздействии дополнительного луча с интенсивностью μ , задержкой τ_s , фазой ψ , длительностью посылки сигнала T_s , а также с информационной фазой φ_k . В результате, получим выражение для сигнального расстояния, обусловленного только приходом в место приема основного и дополнительного сигналов, которое в дальнейшем назовем множителем сигнального расстояния:

$$\Delta S_{0-\pi} \left(\frac{0}{0, \pi} \right) = 2 + \frac{\mu\tau}{T_s} [\cos(\psi) - \cos(\psi - \pi)] + \frac{\mu(T_s - \tau)}{T_s} [\cos(\psi + \varphi_k) - \cos(\psi + \varphi_k - \pi)]. \quad (8)$$

Выражение (8) соответствует (3) для комбинации интерферирующих символов $(0, 0, \pi)$, которое представим как $\left(\frac{0}{0, \pi} \right)$, где в числителе представлена информационная фаза основного сигнала, а в знаменателе — информационные фазы интерферирующего задержанного сигнала. Такая комбинация символов соответствует задержке менее длительности посылки. При задержке дополнительного

луча более длительности посылки множитель сигнального расстояния представляется как:

$$\Delta S_{0-\pi} \left(\frac{0}{\pi, \pi} \right) = 2 + \frac{\mu\tau}{T_s} [\cos(\psi + \varphi_i) - \cos(\psi + \varphi_i - \pi)] + \frac{\mu(T_s - \tau)}{T_s} [\cos(\psi + \varphi_k) - \cos(\psi + \varphi_k - \pi)], \quad (9)$$

$$\Delta S_{0-\pi} \left(\frac{0}{\pi, 0} \right) = 2 + \frac{\mu\tau}{T_s} [\cos(\psi + \varphi_i) - \cos(\psi + \varphi_i - \pi)] + \frac{\mu(T_s - \tau)}{T_s} [\cos(\psi) - \cos(\psi - \pi)], \quad (10)$$

где $\varphi_j, \varphi_k, \varphi_i$ — информационная фаза дополнительного луча при задержке менее длительности посылки. При задержках более длительности посылки необходимо рассматривать уже не два информационных символа φ_j, φ_i , а три — $\varphi_j, \varphi_k, \varphi_i$, где φ_j — информационный символ основного сигнала, а φ_k, φ_i — информационные символы дополнительного сигнала [13].

На рис. 1 приведены зависимости множителя сигнального расстояния при задержке не более длительности посылки $\tau_s < T$, кривые 1 и 2 и кривая 3 при более длительности посылки $\tau_s > T$.

Размах кривых $\Delta S_{0-\pi}$ определяется амплитудой μ и задержкой τ_s , а характер кривых будет определяться разными комбинациями интерферирующих символов и начальной фазой. Кривые на рис. 1 охватывают весь спектр изменений $\Delta S_{0-\pi}$.

Как показал анализ, для бинарной ФМ влияние задержки сказывается только для знакопеременных информационных символов дополнительного луча, в то время как задержка не влияет при неизменных значениях символов. Это свойство характерно для модуляции, где решение о передаче символов при-

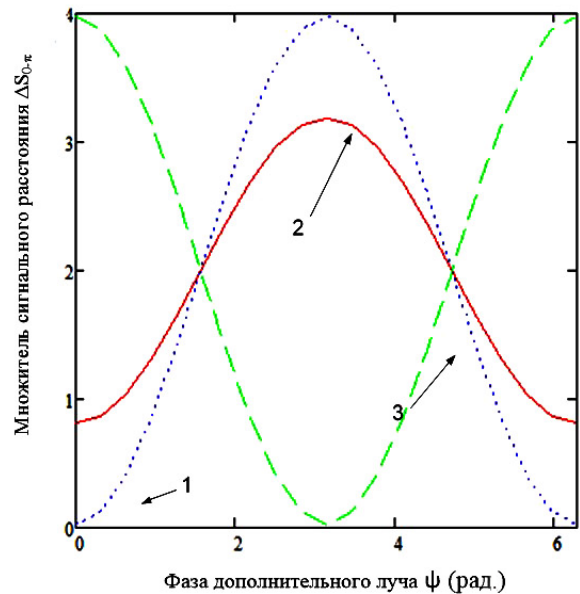


Рис. 1. Зависимость множителя сигнального расстояния для бинарной фазовой модуляции от фазы при различных значениях информационных интерферирующих символов: 1 — $(0,0,0)$; 2 — $(0,0,\pi)$; 3 — $(0,\pi,\pi)$ для $\tau_s = \frac{0,2}{T}$ и $\mu=0,99$
 Fig. 1. Dependence of the signal distance multiplier for binary phase modulation on the phase at different values of information interfering symbols: 1 — $(0,0,0)$; 2 — $(0,0,\pi)$; 3 — $(0,\pi,\pi)$ for $\tau_s = \frac{0,2}{T}$ and $\mu=0,99$

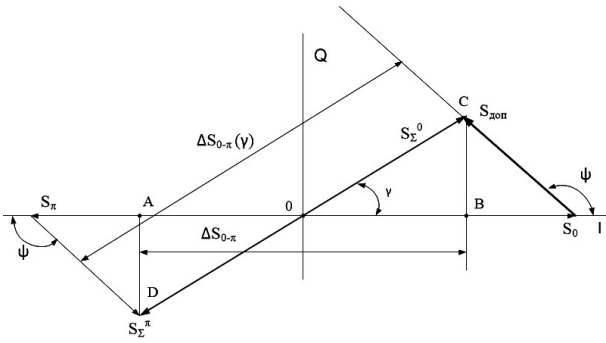


Рис. 2. Векторное представление сигнала расстояния при вращении координат сигнала созвездия для комбинации (0,0,π)
 Fig. 2. Vector representation of the signal distance while rotation of the coordinates of the signal constellation for the (0,0,π) combination

нимается в пределах одной посылки, в то время как для относительной ФМ этого не происходит.

3. Эффективность вращения сигнала созвездия с однократной фазовой модуляцией в двухлучевом канале

Рассмотрим изменение сигнала расстояния с однократной фазовой модуляцией (ФМ-2) для двухлучевой модели многолучевого канала при вращении границ сигнала созвездия.

На рис. 2 представлено сигнал созвездия для ФМ-2, где результирующий вектор является суммой основного и задержанного сигнала, при этом множитель сигнала расстояния равен $\Delta S_{0-\pi}$.

Расчет множителя сигнала расстояния производится на основе квадратурных составляющих множителя сигнала расстояния [13]:

$$Q(S_{\Sigma}^0) = \sin \varphi_j + \mu \left(1 - \frac{\tau}{T_s} \right) \sin(\varphi_j + \psi) + \frac{\mu \tau}{T_s} \sin(\varphi_j + \psi), \quad (11)$$

$$I(S_{\Sigma}^0) = \cos \varphi_j + \mu \left(1 - \frac{\tau}{T_s} \right) \cos(\varphi_j + \psi) + \frac{\mu \tau}{T_s} \cos(\varphi_j + \psi). \quad (12)$$

Использование квадратурных компонент позволяет рассчитать угол поворота границ принятия решения, который равен

$$\gamma = \arctg \left(\frac{Q(S_{\Sigma}^0)}{I(S_{\Sigma}^0)} \right). \quad (13)$$

Множитель сигнала расстояния до поворота сигнала созвездия:

$$\Delta S_{0-\pi} = 2 \cos(\gamma) \sqrt{I^2(S_{\Sigma}^0) + Q^2(S_{\Sigma}^0)}. \quad (14)$$

Множитель сигнала расстояния после поворота сигнала созвездия:

$$\Delta S_{0-\pi} = 2 \sqrt{I^2(S_{\Sigma}^0) + Q^2(S_{\Sigma}^0)}. \quad (15)$$

Использование двух квадратурных компонентов позволяет измерить угол γ , а также рассчитать новое сигнал расстояние.

Исследования показали, что при уменьшении интенсивности дополнительного луча до малых значений разница между $\Delta S_{0-\pi}(\gamma)$ и $\Delta S_{0-\pi}$ уменьшается, а при $\mu = 0$ она пропадает. Множитель сигнала расстояния, как показали расчеты, значительно за-

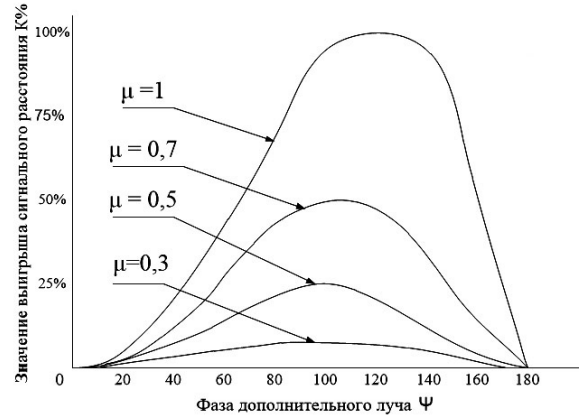


Рис. 3. Зависимость значения выигрыша сигнала расстояния от фазы ψ при различной интенсивности μ дополнительного луча при повороте границ принятия решения для комбинации информационных символов (0,0,0)
 Fig. 3. Dependence of the gain value of the signal distance on the ψ phase at different intensities of the additional beam while rotation of the boundaries for the (0,0,0) information symbols

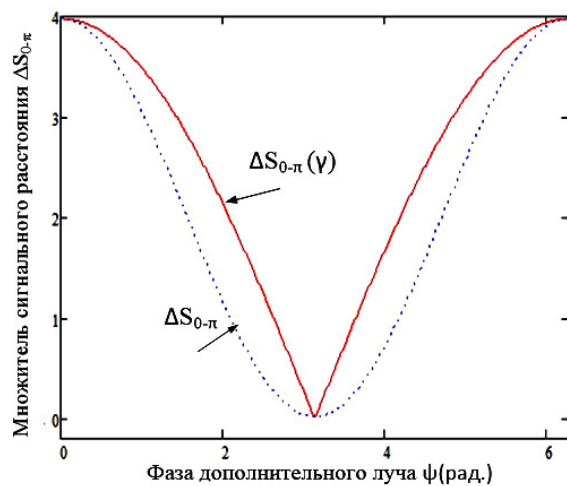


Рис. 4. Зависимость множителя сигнала расстояния для комбинации интерферирующих символов (0,0,0) от фазы для системы без поворота границ принятия решения $\Delta S_{0-\pi}$ и с поворотом $\Delta S_{0-\pi}(\gamma)$ при амплитуде помехи $\mu = 0,99$
 Fig. 4. Dependence of the signal distance multiplier for a combination of the (0,0,0) interfering symbols on the phase for a system without rotation of the $\Delta S_{0-\pi}$ boundaries and with the $\Delta S_{0-\pi}(\gamma)$ rotation at the $\mu = 0,99$ interference amplitude

висит от фазы дополнительного луча при значительной его интенсивности. Для относительной ФМ эта зависимость значительно сильнее.

На рис. 3 показана зависимость увеличения множителя сигнала расстояния от фазы и интенсивности дополнительного луча:

$$K = (\Delta S_{0-\pi}(\gamma) - \Delta S_{0-\pi}) \% .$$

Важной особенностью этих кривых является снижение K при уменьшении интенсивности дополнительного луча, при этом максимальное значение выигрыша определяется как

$$\max K = \mu^2, \text{ с учетом, что } \mu < 1.$$

Как видно на рис. 3, выигрыш при повороте границ принятия решения сильно зависит от интенсивности и фазы дополнительного луча для нулевых

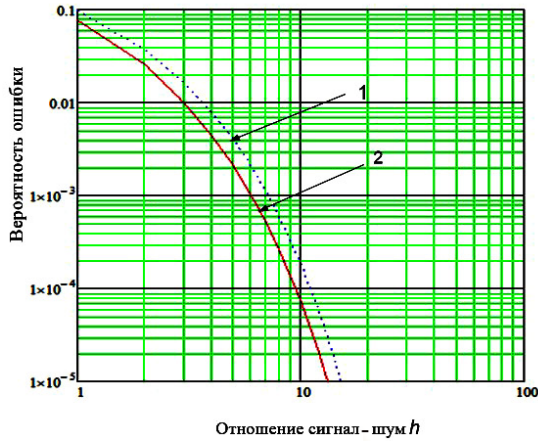


Рис. 5. Кривые помехоустойчивости для адаптивного (кривая 2) и неадаптивного (кривая 1) приема сигналов ФМ-2 для значения амплитуды помех, равной 0,5.

Fig. 5. Noise stability curves for adaptive (curve 2) and non-adaptive (curve 1) reception of FM-2 signals for the 0.5 interference amplitude

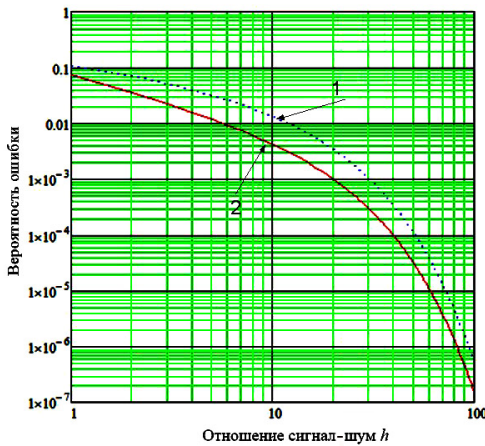


Рис. 6 Кривые помехоустойчивости для адаптивного (кривая 2) и неадаптивного (кривая 1) приема сигналов ФМ-2 для максимального значения амплитуды помех, равной 0,95.

Fig.6. Noise stability curves for adaptive (curve 2) and non-adaptive (curve 1) reception of FM-2 signals for the 0.95 maximum interference amplitude

информационных символов сигнала. Для ненулевых и для различных сочетаний разных символов зависимость от фазы будет снижаться.

На рис. 4 приведены зависимости множителей относительного сигнала для комбинации интерферирующих символов (0, 0, 0) при повороте границ принятия решений $\Delta S_{0-\pi}(\gamma)$ и без поворота $\Delta S_{0-\pi}$. Расчеты сделаны для интенсивности дополнительного луча, равного 0,99. Для комбинации (0, 0, π) увеличение задержки луча приводит к уменьшению результирующего вектора, а для задержки $\tau_s = 0,5T$ дополнительный луч нивелируется.

Для расчета помехоустойчивости демодулятора с ФМ-2 необходимо рассмотреть плотности распределения вероятностей.

Анализ статистических характеристик увеличения множителя сигнальных расстояний показал, что среднее значение равно $K \approx \frac{\mu^2}{2}$. Таким образом, выигрыш при адаптивном изменении границ

принятия решений убывает в квадрате с уменьшением интенсивности дополнительного луча.

Увеличение сигнального расстояния происходит только для определенного диапазона изменения фазы дополнительного луча.

4. Помехоустойчивость однократной фазовой модуляции при вращении сигнального созвездия

Для получения окончательных выводов об эффективности вращения границ принятия решений в канале с многолучевостью необходимо рассмотреть помехоустойчивость при воздействии гауссовской помехи.

Вероятность ошибки при изменении границ принятия решений с учетом (7) определяется как

$$P_{ош} = \int_0^{\infty} Q \left(\sqrt{\frac{\Delta S \cdot 2E}{N_0}} \right) \cdot W(\Delta S) d\Delta S, \quad (16)$$

где $W(\Delta S)$ — плотность распределения вероятностей сигнальных расстояний; E/N — отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности гауссовского шума; $Q(x)$ — табулированный интеграл вероятностей.

На рис. 5 и 6 приведены зависимости средней вероятности ошибки для различной интенсивности отраженного луча от отношения энергии сигнала к спектральной плотности гауссовского шума. Усреднение производилось на основании плотности распределения вероятностей сигнального расстояния для заданной интенсивности и равномерной плотности распределения вероятностей фазы дополнительного луча с помощью математического моделирования на ЭВМ. Следует подчеркнуть, что эти зависимости определяют предельную эффективность фазового демодулятора.

Анализ графиков на рис. 5 и 6 показывает, что вращение сигнального созвездия для ФМ-2 позволяет получить выигрыш 4,5 дБ на уровне вероятности ошибки 10^{-2} при интенсивности дополнительного луча 0,95 дБ, а при интенсивности 0,5 дБ выигрыш составляет 1 дБ. При увеличении кратности модуляции относительная эффективность вращения сигнального созвездия будет уменьшаться. Следует отметить, что выигрыш достигается за счет уменьшения вероятности ошибки в области малых сигнальных расстояний, которые и определяют среднюю вероятность ошибки.

Заключение

Проведенный анализ эффективности применения адаптивного изменения конфигурации границ принятия решения для демодуляции сигналов с ФМ-2 в канале с многолучевостью позволяет сделать следующие выводы:

- на основе геометрической интерпретации конфигурации границ принятия решения определен угол поворота, который увеличивает сигнальное расстояние в зависимости от информационного потока модулирующего сигнала;

- получена зависимость эффективности вращения границ принятия решения от интенсивности дополнительного луча;

- при максимальной интенсивности дополнительного луча достигается наибольший выигрыш, который равен 4,5 дБ по отношению к сигнал — шум;

- задержка дополнительного луча для бинарной модуляции может варьироваться в любых пределах в отличие от относительной бинарной фазовой, где

решение о передаче того или иного символа принимается на основе обработки двух соседних посылок;

— рассмотренная методика анализа позволяет рассмотреть помехоустойчивость многократной ФМ в канале с многолучевостью, но при задержках дополнительного луча не более длительности посылки;

— применение вращения сигнального созвездия для пространственно-разнесенного приема позволит значительно увеличить эффективность системы связи.

Список источников / References

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. Москва: Вильямс, 2016. 1104 с. ISBN 978-5-8459-0497-3.

Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye [Digital communications. Theoretical foundations and practical application]. 2 nd ed. Moscow, 2016. 1104 p. ISBN 978-5-8459-0497-3. (In Russ.).

2. Сорохтин М. М., Морозов О. А., Логинов А. А. Адаптивный алгоритм анализа фазы для приема и декодирования сигналов с фазовой и частотной манипуляцией // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Радиофизика. 2004. № 1. С. 105–110. EDN: HROXDZ.

Sorokhtin M. M., Morozov O. A., Loginov A. A. Adaptivnyy algoritm analiza fazy dlya priyema i dekodirovaniya signalov s fazovoy i chastotnoy manipulyatsiyey [Adaptive phase analysis algorithm for receiving and decoding phase and frequency manipulated signals]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Seriya: Radiofizika*. 2004. No. 1. P. 105–110. EDN: HROXDZ. (In Russ.).

3. Тарасов Г. А., Тарасов А. Г. Адаптивная пространственно-временная обработка ФМ-сигналов в многолучевых каналах связи на основе алгоритма Калмана // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 4. С. 27–32. EDN: KZNCOP.

Tarasov G. A., Tarasov A. G. Adaptivnaya prostranstvenno- vremennaya obrabotka FM-signalov v mnogoluchevykh kanalakh svyazi na osnove algoritma Kalmana [Adaptive spatiotemporal processing of FM signals in multipath communication channels based on the Kalman algorithm]. *Tsifrovaya obrabotka signalov. Digital Signal Processing*. 2009. No. 4. P. 27–32. EDN: KZNCOP. (In Russ.).

4. Куликов Г. В., До Ч. Т. Эффективность фазового алгоритма адаптивной фильтрации при приеме сигналов с многопозиционной фазовой модуляцией // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. С. 1–16. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.4. EDN: AGARIX.

Kulikov G. V., Do T. T. Effektivnost' fazovogo algoritma adaptivnoy fil'tratsii pri priyeme signalov s mnogopozitsionnoy fazovoy modulyatsiyey [Efficiency of the phase algorithm of adaptive filtering for receiving signals with multi-position phase shift keying]. *Zhurnal radioelektroniki. Journal of Radio Electronics*. 2020. No. 4. P. 1–16. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.4. EDN: AGARIX. (In Russ.).

5. Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 1–17. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.3.4. EDN: JTTZCA.

Nguyen V. D. Pomekhoustoychivost' korrelyatsionnogo priyemnika signalov s mnogopozitsionnoy fazovoy manipulyatsiyey pri nalichii retranslirovannoy pomekhi [Noise immunity of a coherent reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of retranslated interference]. *Zhurnal radioelektroniki. Journal of Radio Electronics*. 2019. No. 3. P. 1–17. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.3.4. EDN: JTTZCA. (In Russ.).

6. Проценко Э. В., Родионов А. Ю. Анализ современных видов манипуляции сигнала беспроводных систем связи // Вестник СибГУТИ. 2022. Т. 16, № 4. С. 43–58. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-4-43-58. EDN: HCUTGH.

Proshchenok E. V., Rodionov A. Yu. Analiz sovremennykh vidov manipulyatsii signala besprovodnykh sistem svyazi [Modern types of signal manipulation analysis of wireless communication systems]. *Vestnik SibGUTI. The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2022. Vol. 16, no. 4. P. 43–58. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-4-43-58. EDN: HCUTGH. (In Russ.).

7. Казак П. Г., Шевцов В. А. Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики // Труды МАИ. 2021. № 118. DOI: 10.34759/trd-2021-118-06. EDN: GDLNKI.

Kazak P. G., Shevtsov V. A. Printsipy postroyeniya energoefektivnoy sistemy sotovoy svyazi i besprovodnogo shirokopolosnogo dostupa v Internet dlya Arktiki [Principles of design an energy-efficient cellular communication system and wireless broadband Internet access for the Arctic]. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. DOI: 10.34759/trd-2021-118-06. EDN: GDLNKI. (In Russ.).

8. Паршуткин А. В., Бучинский Д. И., Комлык Д. А. Исследование помехоустойчивости приемников сигналов с дискретной фазовой модуляцией в условиях помех с угловой модуляцией и шумов // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-16. EDN: ADQAOF.

Parshutkin A. V., Buchinsky D. I., Komlyk D. A. Issledovaniye pomekhoustoychivosti priyemnikov signalov s diskretnoy fazovoy modulyatsiyey v usloviyakh pomekh s uglovoymodulyatsiyey i shumov [Investigation of noise immunity of signal receivers with discrete phase modulation in the conditions of interference with angular modulation and noise]. *Trudy MAI*. 2023. No. 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-16. EDN: ADQAOF. (In Russ.).

9. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи // Вестник Воронежского технического университета. 2010. Т. 6, № 11. С. 108–112. EDN: MWJJWF.

Fedoseyev V. E., Ivanov M. S. Metodika i rezul'taty analiza potentsial'noy pomekhoustoychivosti priyema tsifrovogo signala na fone manipulyrovannoy strukturnoy pomekhi [Technique and results of the analysis of the potential noise stability of reception of the digital signal against the manipulated structural hindrance]. *Vestnik Voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2010. Vol. 6, no. 11. P. 108–112. EDN: MWJJWF. (In Russ.).

10. Nandi M. Symbol error probability of coherent PSK system in the presence of two path interference. *International Journal of Physics and Applications*. 2013. Vol. 5, no. 2. P. 133–137.

11. Nasri S. Bit error rate analysis for BPSK modulation in presence of noise and two co-channel interferers. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010. Vol. 10, no. 5. P. 152–156.

12. Сидельников Г. М. Помехоустойчивость демодулятора КАМ-16 при трансформации границ сигнального созвездия в канале с многолучевостью // Вестник Новгородского государственного университета. 2021. № 2 (123). С. 76–81. DOI: 10.34680/2076-8052.2021.2(123).76-81. EDN: RZEDIJ.

Sidelnikov G. M. Pomekhoustoychivost' demodulyatora KAM-16 pri transformatsii granits signal'nogo sozvezdiya v kanale s mnogoluchevost'yu [Noise stability of the KAM-16 signal demodulator when transforming the boundaries of the signal constellation in a channel with multipath]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Vestnik of Novgorod State University*. No. 2 (123). P. 76–81. DOI: 10.34680/2076-8052.2021.2(123).76-81. EDN: RZEDIJ. (In Russ.).

13. Сидельников Г. М. Помехоустойчивость демодуляторов сигнала с фазовой и относительной фазовой модуляцией

в каналах с многолучевостью // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 146–151. EDN: ZUQNKZ.

Sidelnikov G. M. Pomekhoustoychivost' demodulyatorov signalov s fazovoy i otnositel'noy fazovoy modulyatsiyey v kanalakh s mnogoluchevost'yu [Noise stability of demodulator of signals with PSK and DPSK in multipath channels]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017. No. 5 (155). P. 146–151. EDN: ZUQNKZ. (In Russ.).

СИДЕЛЬНИКОВ Геннадий Михайлович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радиотехнические системы» Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск.

SPIN-код: 7024-7984

AuthorID (РИНЦ): 1070450

Адрес для переписки: olgasid5353@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 14.04.2025; одобрена после рецензирования 29.07.2025; принята к публикации 08.08.2025.

SIDELNIKOV Gennady Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Radio Engineering Systems Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk.

SPIN-code: 7024-7984

AuthorID (RSCI): 1070450

Correspondence address: olgasid5353@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 14.04.2025; approved after reviewing 29.07.2025; accepted for publication 08.08.2025.

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

включен в **Перечень** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Адрес редакции и издателя: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 424;
тел. (3812) 65-32-08; e-mail: onv@omgtu.ru

Адрес типографии: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 333;
тел. (3812) 65-32-08.
Цена свободная